



Biblioteka Politechniki Krakowskiej



100000294760

Die
Dynamoelektrischen Maschinen.

in 2.
Erster Theil.



Die

Dynamoelektrischen Maschinen.

Ein Handbuch

für

Studirende der Elektrotechnik.

Von

Silvanus P. Thompson,

Direktor und Professor der Physik an der technischen Hochschule der Stadt und Gilden
von London.

Sechste Auflage.

Nach **C. Grawinkel's** Uebersetzung neu bearbeitet

von

K. Streeker und F. Vesper.

Erster Theil.

Mit 271 in den Text gedruckten Abbildungen und 12 grossen Figurentafeln.



Halle a. S.

Druck und Verlag von Wilhelm Knapp.
1900.

H. 15.

8

II 5364



Akc. Nr.

5074/50

Vorwort.

Die Thompson'schen »Dynamomaschinen« haben sich, wie die rasch auf einander folgenden Auflagen zeigen, in Deutschland gut eingebürgert. Um so mehr schien es erforderlich, das Buch den deutschen Verhältnissen anzupassen.

Es ist ja selbstverständlich, dass das englische Original die seinen Lesern näher gelegenen englischen Firmen und deren Constructionen mehr berücksichtigt, als ausländische, obgleich das Thompson'sche Buch sich von aller Einseitigkeit frei gehalten hat. Ebenso selbstverständlich ist aber auch die Forderung, dass eine deutsche Ausgabe des Buches die deutsche Elektrotechnik mehr vor-, die englische zurücktreten lässt.

Wir haben daher, unterstützt von dem bereitwilligen Entgegenkommen der Verlagsbuchhandlung, eine Anzahl der Tafeln, die dem Werke beigegeben werden, benutzt, um hervorragende neue deutsche Maschinenconstructions darzustellen, und haben auch an manchen Stellen des beschreibenden Textes neue Abbildungen deutschen Ursprungs eingefügt. Auch im zweiten Theil des Buches sollen die Erzeugnisse der deutschen elektrotechnischen Industrie die gebührende Berücksichtigung finden. Zahlreiche Firmen haben uns durch Ueberlassung von Zeichnungen und Clichés in unseren Bemühungen unterstützt; wir möchten ihnen auch an dieser Stelle unseren wärmsten Dank sagen.

Berlin, September 1899.

K. Strecker. F. Vesper.

Inhaltsverzeichniss zum ersten Theil.

	Seite
Kapitel I. Einleitung	1
Kapitel II. Geschichtliche Angaben	5
Kapitel III. Physikalische Theorie der dynamoelektrischen Maschinen . .	24
Bestandtheile der dynamoelektrischen Maschinen	32
Gleichstrommaschinen	36
Anker	36
Ankerkerne	43
Maassgebende Gesichtspunkte für den Entwurf einer Maschine	44
Methoden zur Erregung des Feldmagnetismus	46
Magneto-Dynamomaschine	46
Besonders erregte Dynamomaschine	47
Reihen- oder Hauptstrommaschine	48
Nebenschlussmaschine	49
Selbsterregende Dynamomaschine mit getrenntem Erregerkreise	50
Schaltungsarten	52
Schaltungen für Gleichspannung	53
1. Reihenschaltung bei besonderer Erregung (Deprez)	53
2. Reihenschaltung in Verbindung mit Erregung durch eine Magnetomaschine (Perry)	53
3. Reihenschaltung in Verbindung mit einem Nebenschluss	54
4. Reihenschaltung in Verbindung mit langem Nebenschlusse	55
5. Reihenschaltung in Verbindung mit einer besonderen Wickelung	55
Kapitel IV. Wirkungen und Gegenwirkungen im Anker	56
Induction in einem gleichförmigen horizontalen magnetischen Felde	59
Gegenwirkungen der Ströme im Anker	66
Quermagnetisirende Wirkung des Ankerstromes	67
Neutrale Punkte	74
Funkenbildung am Stromabgeber	74
Entmagnetisirende Thätigkeit des Ankers	80
Todte Umläufe	83
Scheinbarer Widerstand	84
Wirbelströme	85
Blätterung	86

	Seite
Wirbelströme in den Polstücken	88
Wirkungen der gegenseitigen Induction	89
Verzögerung infolge der Selbstinduction	90
Hilfsmittel gegen Inductionsstörungen	90
Kapitel V. Mechanische Wirkungen und Gegenwirkungen im Anker	92
Zug auf die Ankerwicklung	92
Wirkung des Einbettens der Ankerleiter	95
Drehmoment und Geschwindigkeit	95
Leistung von Dynamomaschinen und Triebmaschinen	96
Drehmoment und Stromstärke	97
Zug auf die Ankerleiter	98
Hilfsmittel für den Antrieb	100
Kraftverluste	100
Wirkungsgrad von Dynamomaschinen (Stromerzeugern) und Elektromotoren	101
Beziehung der Grösse zur Leistungsfähigkeit und zum Wirkungsgrade	102
Kapitel VI. Gesetze des Magnetismus, magnetische Eigenschaften des Eisens	106
Begriffserklärungen und allgemeine Eigenschaften	106
Magnetomotorische Kraft	111
Widerstand des magnetischen Kreises	114
Curven der Magnetisirung	115
Wirkungen des Luftzwischenraumes im magnetischen Kreise	120
Wirkung von Verbindungsstellen	121
Wirkungen der Erwärmung	123
Rückständiger Magnetismus	123
Hysteresis	124
Kreisläufe der Magnetisirung	125
Anwachsen des Magnetismus	132
Verzögerung des Magnetismus	132
Langsame Veränderungen in den magnetischen Eigenschaften des Eisens	133
Näherungsformel für das Gesetz des Elektromagnets	133
Magnetische Einheiten	135
Kapitel VII. Der magnetische Kreis	136
Streuung der magnetischen Linien	141
Berechnung der Zerstreuung	145
Kapitel VIII. Formen der Feldmagnete	148
Kapitel IX. Elementare Theorie der Dynamomaschine. Magneto-Maschinen und besonders erregte Maschinen. Reihenmaschinen. Neben- schlussmaschinen	157
Bezeichnungen	158
Grundgleichung der Dynamomaschine	159
Schwankungen der elektromotorischen Kraft in einem Anker mit einer offenen Spule	162
Schwankungen in einem Anker mit geschlossener Wickelung und mit Abtheilungen	163

	Seite
Berechnung der Schwankungen der elektromotorischen Kraft	
in Anker mit geschlossener Wickelung	166
Messung der Schwankung	166
Wirkung der ungleichzeitigen Stromwendung	167
Messung der Zahl der Kraftlinien \ominus	167
Die Magnetomaschine und die besonders erregte	
Maschine	169
Spannungen an den Klemmen einer Dynamomaschine. Spannungs-	
verlust	169
Beziehung zwischen der gesammten elektromotorischen Kraft	
und der Klemmenspannung	170
Die besonders erregte Dynamomaschine	172
Charakteristik der Magnetomaschine und der besonders er-	
regten Dynamomaschine	172
Wirkungsgrad und ökonomischer Coëfficient der Dynamo-	
maschinen	174
Aenderung des elektr. Güteverhältnisses mit der Stromstärke	176
Die Reihenmaschine	176
Ökonomischer Coëfficient (Güteverhältniss) einer Reihen-	
maschine	177
Die Nebenschlussmaschine	178
Ökonomischer Coëfficient (Güteverhältniss) der Nebenschluss-	
maschine	179
Kapitel X. Charakteristische Curven	183
Leistungslinien	186
„Aeusserer“ Charakteristiken oder Curven mit Berücksichtigung	
der Klemmenspannung	188
Charakteristik von Reihenmaschinen	190
Beziehung der Charakteristik zur Umlaufgeschwindigkeit	192
Ableitung des Widerstandes aus der Charakteristik	193
Beziehung der Charakteristik zur Ankerwicklung und Magnet-	
wicklung	194
Kritische Stromstärke einer Reihenmaschine	195
Charakteristik der Nebenschlussmaschine	196
Curve des gesammten Ankerstromes	200
Gesamtcharakteristik einer Nebenschlussmaschine	200
Charakteristik einer Nebenschlussmaschine mit Dauer-	
magnetismus	201
Unterschiede im Verhalten der Reihen- und der Nebenschluss-	
maschine	204
Weitere Anwendungen der Charakteristik	206
Beziehung zwischen Charakteristik und Grösse der Maschine	206
Anwendung der Charakteristik auf Maschinen, welche zum	
Laden von Sammlerbatterien benutzt werden	207
Kapitel XI. Maschinen für Gleichspannung	209
Betriebsbedingungen	209
Der Handregler von Edison	211
Dynamomaschinen mit Selbstregelung	212

	Seite
Theorie der Selbstregelung	213
1. Regelnde Reihenwickelungen + Dauermagnete	214
2. Reihenmaschine + Besondere erregende Wickelungen	216
Geometrische Darstellung der Fälle 1 und 2	217
3. Reihenmaschine + unabhängige elektromotorische Kraft im Hauptkreise	218
4. Regelnde Reihenwickelungen + Erregende Nebenschluss- wickelungen: Gemischte Wickelung	218
Gleichbleibende Spannung am fernen Ort	222
Anordnung der gemischten Wickelung	222
Praktisches Verfahren zur Bestimmung der Verbundwickelung	223
Entwurf von Maschinen für Gleichspannung	224
Charakteristik der Verbundmaschine	224
Aeussere Charakteristiken selbstregelnder Maschinen	226
Kapitel XII. Theorie der Ankerwickelung (Gleichstrom)	229
Wickelungs-Diagramme	235
Wickelungsformeln für geschlossene Ankerwickelungen	240
Trommelwickelungen	243
Vielpolige Ringwickelungen	257
Scheibenwickelungen	260
Kapitel XIII. Praktischer Aufbau der Anker	265
Ankerkerne	265
Gezahnte Kerne	267
Durchbohrte Kernscheiben	271
Triebspeichen und Ankersterne	271
Isolirung der Eisenkerne	275
Lüftung der Anker	275
Abgleichung der Masse des Ankers	276
Triebstücke	276
Bindedrähte	277
Wickelung der Anker	278
Wickelung für Ringkerne	280
Trommelwickelung	283
Kapitel XIV. Stromabgeber, Bürsten und Bürstenhalter	292
Stäbe des Stromabgebers	293
Isolation	294
Bau der Stromabgeber	294
Bürsten	298
Bürstenhalter und Bürstenhebel	301
Bürsten und Stromabnehmer für Wechselstrom- maschinen	305
Kapitel XV. Mechanische Einzelheiten für den Entwurf und den Bau	306
Druck auf die Lager	306
Gyrostatische Thätigkeit des Ankers	307
Zapfen	308
Lager und Gestelle	311
Kugellager	311

	Seite
Kammzapfenlager	312
Kugelschalenlager	312
Schmiergefäße	313
Keile und Federn	315
Riemenscheiben und Riemen	315
Bodenplatten	315
Kuppelungen	316
Kapitel XVI. Elemente für den Entwurf von Dynamomaschinen	317
Berechnung der Wickelungen	317
Elektrische Berechnungen	323
Leistungsberechnungen	325
Magnetische Berechnungen	326
Berechnungen des magnetischen Kreises	328
Berechnungen für Gleichstrommaschinen	330
I. Beispiel. Maschine von Edison-Hopkinson	331
II. Beispiel. Dynamomaschine von Kapp	334
III. Beispiel. Entwurf einer Compound-Dynamomaschine	342
Nützliche Winke für den Entwurf einer Maschine	344
Umlaufgeschwindigkeit	344
Kernscheiben	344
Grenze der Magnetisirung	345
Günstigste Ausnutzung des Kupfers	345
Abmessung des Drahtes für die Ankerwicklung	346
Erhitzung der Magnetwickelungen	346
Kraftverluste in Kupferleitern bei verschiedenen Stromdichten	348
Zulässige Erwärmung und Oberfläche für die Ausstrahlung	350
Länge und Durchmesser von Ankern	353
Querschnitt der Feldmagnete	354
Symmetrie der Feldmagnete	354
Wirkung der Verbreiterung des Zwischenraumes	355
Interferenz des Ankerfeldes	356
Grenzen der Belastung und Punkt für die Funkenlosigkeit	357
Anordnungen zur Ausgleichung der Gegenwirkung des Ankers	362
Vermehrung des magnetischen Widerstandes	364
Anbringung einer besonderen Wickelung	365
Zusammendrängung des Feldes	369
Selbstaussgleichende Wickelungen	370
Entwurf vielpoliger Maschinen	372
Zweckmässigste Weite des Zwischenraumes	374

Verzeichniss der Tafeln.

- I. Gleichstrommaschine L H₅ von Siemens & Halske Aktien-Gesellschaft.
 - II. Anker einer zweipoligen Trommelmaschine von Kapp.
 - III. Gleichstrommaschine G VII der Deutschen Elektrizitätswerke in Aachen.
 - IV. Maschine von Brown.
 - V. Vierpolige Gleichstrommaschine mit senkrechter Achse von Brown.
 - VI. Vielpolige Gleichstrommaschine mit senkrechter Achse der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft in Berlin.
 - VII. Trommelanker von Brown.
 - VIII. Vielpolige Gleichstrommaschine (Innenpolmaschine) von Siemens & Halske Aktien-Gesellschaft.
 - IX. Direct gekuppelte vielpolige Gleichstrommaschine der Actien-Gesellschaft Elektrizitätswerke (vorm. O. L. Kummer & Co.).
 - X. Radanker-Maschine von Fritsche & Pichon in Berlin.
 - XI. Direct gekuppelte vielpolige Gleichstrommaschine der Union-Elektrizitäts-Gesellschaft in Berlin.
 - XII. Mordey'sche Wechselstrommaschine.
 - XIII. Dreiphasen - Wechselstromerzeuger der Elektrizitäts - Aktiengesellschaft vormals Schuckert & Co. in Nürnberg.
 - XIV. Vielpolige Gleichstrommaschine (Doppelschwungrad-Maschine) der Elektrizitäts - Actiengesellschaft vorm. W. Lahmeyer & Co. in Frankfurt a. M.
 - XV. Parsons' Dampfturbine mit Wechselstrommaschine.
 - XVI. Wechselstrommaschine des Helios, Elektrizitäts-Aktiengesellschaft in Köln-Ehrenfeld.
 - XVII. Dreiphasen-Stromerzeuger für hohe Spannung der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft in Berlin.
 - XVIII. Dreiphasen-Stromerzeuger für hohe Spannung der Siemens & Halske Aktien-Gesellschaft in Berlin.
 - XIX. Dreiphasenmotor der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft in Berlin.
 - XX. Dreiphasenmotor der Siemens & Halske Aktien-Gesellschaft in Berlin.
 - XXI. Dreiphasiger Wechselstrommotor von Brown, Boveri & Co. in Baden.
 - XXII. Dreiphasen-Transformator der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft in Berlin. Dreiphasen-Transformator der Siemens & Halske Aktien-Gesellschaft in Berlin. Wechselstrom-Transformator der Maschinenfabrik Oerlikon in Oerlikon.
-

Berichtigungen.

- S. 39 Z. 1 von unten lies XVIII statt XVII.
S. 254 Z. 10 und 11 von oben lies Schleifenwicklung statt einfache Wellenwicklung.
S. 305 Z. 13 von oben lies Fig. 422 statt 411.
S. 305 Z. 3 von unten lies Fig. 425 statt 421.
S. 384 Z. 14 von oben lies Wynne statt Winne.
S. 530 Z. 7 von unten lies Fig. 354.
S. 556 Z. 8 von oben lies Fig. 422 statt 411.
S. 607 Z. 5 und 6 von oben lies Parsons statt Parson.
-

Kapitel I.

Einleitung.

Eine dynamoelektrische Maschine ist zur Umsetzung mechanischer Energie in elektrische (in Form elektrischer Ströme) bestimmt und lässt auch den umgekehrten Vorgang zu. Die Umsetzung erfolgt, indem Leiter (gewöhnlich in Gestalt von Wickelungen [Spulen] aus Kupferdraht) in einem magnetischen Felde sich drehen. Diese Begriffserklärung ist auf alle Maschinen anwendbar, deren Thätigkeit auf dem von Faraday im Jahre 1831 entdeckten Vorgange der magnetoelektrischen Induction¹⁾ beruht.

Jede dynamoelektrische Maschine vermag zwei verschiedene Verrichtungen zu leisten, von denen die eine die Umkehrung der anderen ist. Unter Aufwendung mechanischer Arbeit, etwa mittels einer Dampfmaschine getrieben, liefert die dynamoelektrische Maschine elektrische Ströme; mittels elektrischer Ströme, die einer anderen Stromquelle, etwa einer Batterie entstammen, vermag sie mechanische Arbeit zu leisten. Einerseits dient sie als »Stromerzeuger«, anderseits als »Elektromotor«. Sämmtliche Dynamomaschinen zerfallen in zwei grosse Abtheilungen, die sich durch die Art des Stromes

1) Unter „Induction“ ist die eigenthümliche Erzeugung einer elektromotorischen Kraft zu verstehen; das Wort stammt von Faraday selbst: „Then I found that magnets would induce just like voltaic currents, and by bringing helices and wires and jackets up to the poles of magnets, electrical currents were induced in them . . . These two kinds of induction I have distinguished by the terms Volta-electric and Magneto-electric inductions.“ (Dann fand ich, dass Magnete wie elektrische Ströme induciren; indem ich Spulen, Drähte und Hülsen auf die Pole von Magneten brachte, wurden darin elektrische Ströme inducirt . . . Diese zwei Arten der Induction habe ich durch die Bezeichnungen voltaelektrische und magnetoelektrische Induction unterschieden.) Faraday an R. Phillips, November 1831. Obgleich Faraday den Sinn des Wortes als den der Handlung des Inducirens festgesetzt hat, folgen doch neuere Autoren, auch Hopkinson, dem unglücklichen Beispiel Maxwell's, indem sie das Wort Induction in einem anderen Sinne gebrauchen und darunter die Dichte der Kraftlinien verstehen. Dergleichen müsste vermieden werden.

unterscheiden. Entweder ist der Strom gleichgerichtet (d. h. er fließt stets in derselben Richtung), oder er wechselt die Richtung (d. h. die Richtung unterliegt schnellen Umkehrungen).

Nach dem Gesagten sind vier Klassen zu betrachten, und zwar:

- a) Dynamomaschinen zur Erzeugung von Gleichstrom (Gleichstrommaschinen);
- b) Dynamomaschinen zur Erzeugung von Wechselstrom (Wechselstrommaschinen);
- c) Triebmaschinen für Gleichstrom (Gleichstrommotoren);
- d) Triebmaschinen für Wechselstrom (Wechselstrommotoren).

Bei Wechselstromerzeugern hat man noch weiter einzutheilen in Maschinen für einphasigen Strom und Maschinen für zwei oder mehr Ströme von verschiedenen Phasen.

Im Allgemeinen besteht jede Dynamomaschine, sei sie zum Gebrauch als Stromerzeuger oder als Motor bestimmt, aus zwei wesentlichen Theilen: einem feststehenden eisernen Feldmagnete von massiver Bauart, umgeben von isolirten Kupferdrahtwindungen, und einem Anker. Der Letztere bildet eine eigenthümliche Anordnung von Kupferleitern, die gewöhnlich auf dem Umfange eines Ringes, einer Trommel oder Scheibe aufgewunden sind; der Anker sitzt fest auf einer Achse, welche gedreht werden kann. Um die elektrischen Ströme von dem Anker abzuleiten und in den Stromkreis überzuführen oder für das Umgekehrte, dienen besondere Vorrichtungen — Stromabgeber oder Stromwender —; diese bilden einen Theil des Ankers und drehen sich mit dem letzteren. Gegen die in Bewegung befindliche Oberfläche des Stromabgebers oder Stromwenders liegen feststehende sogen. Sammelbürsten, auch kurz Bürsten genannt, an, welche eine gleitende Verbindung des Ankers mit dem Stromkreise herstellen.

In allen Fällen, wo die Sammelbürste von einem Metallstück auf ein anderes übergeht, indem sie dabei Verbindungen im Stromkreise ändert, ist der umlaufende Theil als »Commutator« (Stromwender) bekannt. In denjenigen Fällen, wo es sich nicht um die Aenderung von Verbindung, sondern nur um eine gleitende Verbindung mit einem und demselben Metallstück handelt, nennt man den umlaufenden Theil Gleitring oder Schleifring.

Der Feldmagnet soll ein magnetisches Feld von grosser Ausdehnung und Stärke hervorbringen, d. h. eine sehr grosse Zahl von Kraftlinien in demjenigen Raume erzeugen, in dem die Leiter des Ankers sich drehen.

Der Feldmagnet — Magnet oder Elektromagnet — muss aus diesem Grunde gross, kräftig und richtig gebaut sein, mit Polen von solcher Gestalt, dass die Kraftlinien in dem für den Anker bestimmten Raume ausgenutzt werden. Das magnetische Feld und die magnetischen Eigenschaften des Eisens werden im Kapitel VI, die Grundgesetze des magnetischen Kreises mit Einschluss des Nothwendigen über die baulichen Verhältnisse von Feldmagneten in den Kapiteln VII, VIII und XVI behandelt.

Der Anker soll sich in dem magnetischen Felde drehen, während elektrische Ströme in seinen Kupferwindungen oder Leitern fliessen, und soll während dieser Drehung elektromotorische Kräfte erzeugen durch den Vorgang, den wir »Schneiden der magnetischen Kraftlinien« nennen. In vielen neueren Wechselstrommaschinen steht der Anker still, während der Feldmagnet sich dreht. Derjenige Theil soll Anker genannt werden, der, möge er nun sich drehen oder fest stehen, mit den Leitungen des äusseren Stromkreises verbunden ist, um ihnen Strom zu liefern, wenn die Maschine Strom erzeugt, oder Strom von ihnen zu empfangen, wenn sie als Motor dient.

Wir wollen uns nun daran erinnern, dass zwischen einem Drahtleiter (der einen Theil eines Kreises bildet) und einem magnetischen Felde eine zweifache Wirkung stattfindet.

Erstens: wenn der Drahtleiter kräftig durch das magnetische Feld so bewegt wird, dass er die magnetischen Kraftlinien schneidet, entstehen elektrische Ströme in dem Leiter; zur Bewegung ist mechanische Arbeit erforderlich. Dieser von Faraday entdeckte Vorgang wird als »magnetoelektrische Induction« bezeichnet. In jedem Falle bedingt die Induction oder Erzeugung der Ströme die Anwendung mechanischer Kraft und Verausgabung von Arbeit. Hierauf beruht die Dynamomaschine, wenn sie als »Stromerzeuger« benutzt wird.

Zweitens: wenn der Drahtleiter, während er sich im magnetischen Felde befindet, einen elektrischen Strom (aus beliebiger Quelle) fortführt, so erleidet er einen seitlichen Angriff, der ihn parallel mit sich selbst durch die Kraftlinien zu führen bestrebt ist, so dass er Kraft zu äussern und Arbeit zu leisten vermag. Diese Umkehrung der erstgenannten Thätigkeit bildet die Grundlage der Dynamomaschine, wenn sie als »Motor« benutzt wird.

Im ersten Falle wird eine mechanische Kraft zur Bewegung des Ankers gebraucht, im zweiten Falle wird durch die Drehung des Ankers eine Quelle mechanischer Kraft geschaffen.

Ist ein magnetisches Feld vorhanden, und wendet man Arbeit auf, um den Leiter zu bewegen, so erhält man elektrische Ströme; ist das Feld vorhanden und sendet man Ströme durch den Leiter, so geräth er in Bewegung und liefert Arbeit. Mag die Maschine als Stromerzeuger oder als Motor benutzt werden, das magnetische Feld muss vorhanden sein. Die Grundlage der Theorie bildet daher die Theorie des magnetischen Feldes.

Da jede Dynamomaschine entweder als Stromerzeuger oder als Motor arbeitet (wenigstens theoretisch), so würde es möglich sein, eine allgemeine Theorie für eine Maschine, die zu diesen beiden Verrichtungen dient, zu entwickeln. Aus Gründen der Einfachheit werden jedoch die beiden Verrichtungen in dem vorliegenden Werke gesondert betrachtet.

Die mathematische Theorie der Dynamomaschine ist verwickelt und ändert die Form der Darstellung je nach den verschiedenen Klassen von Maschinen, die gegenwärtig in der Bezeichnung »Dynamomaschine« einbegriffen sind. Die neueren Fortschritte in der theoretischen Behandlung von Fragen auf magnetischem Gebiete haben die Sache indessen so vereinfacht, dass man nunmehr aus der Bauart und den Abmessungen einer Dynamomaschine bei gegebenen Bedingungen für Geschwindigkeit und Belastung ihre elektrische Leistung vorher bestimmen kann.

Die Theorie der Wechselstrommaschinen ist in manchen Punkten von der der Gleichstrommaschinen verschieden. Die in diesem Werke zu entwickelnde Theorie soll keine allgemeine mathematische Theorie sein, es liegt in der Absicht, mehr physikalische und auf Versuche sich gründende Erörterungen als mathematische anzustellen; dagegen wird es selbstverständlich ebenso wie in jedem technischen Werke nothwendig sein, von mathematischen Formeln Gebrauch zu machen.

Eine physikalische Theorie der Dynamomaschine ist keineswegs neu, obgleich vor dem Erscheinen der Vorlesungen des Verfassers im Jahre 1882 keine vollständige Theorie entwickelt worden ist¹⁾.

Vor näherem Eingehen auf die physikalische Theorie der Dynamomaschine wird es zweckmässig sein, einige erklärende geschichtliche Angaben vorzuschicken.

1) Siehe J. M. Gaugain, *Annales de Chimie et de Physique*, 1873; Antoine Breguet, desgl. 1879; Du Moncel, *Exposé des Applications de l'Electricité*, Bd. 2; Niaudet, *Machines électriques*; Dredge's *Electric Illumination*; Schellen, *Die magneto- und dynamo-elektrischen Maschinen* (3. Aufl. 1883).

Kapitel II.

Geschichtliche Angaben.

Faraday's Entdeckung der magnetoelektrischen Induction von Strömen fiel in den Herbst des Jahres 1831 und wurde am 24. November der »Royal Society« in einem Aufsätze mitgetheilt, welcher sich in den »Philosophical transactions« abgedruckt findet, sowie später in den ersten Band von Faraday's Experimental Researches in Electricity aufgenommen worden ist. Seine ersten Versuche bezogen sich auf die Induction von Strömen in einer Drahtspule, wenn Ströme in deren Nähe entstanden oder verschwanden; er ging dann zu den Strömen über, die in einer vor den Polen eines kräftigen Stahlmagnetes bewegten Spule entstehen.

Nachdem er in dieser Weise Elektrizität von Magneten erhalten hatte, versuchte er die Herstellung einer »neuen elektrischen Maschine«. Eine Scheibe aus Kupfer, 30,5 cm (12 Zoll) im Durchmesser und etwa 5 mm ($\frac{1}{5}$ Zoll) stark, wurde auf einer Messingachse befestigt und drehbar in einem Gestell aufgehängt. Der Rand der Scheibe (Fig. 1) befand sich zwischen den Polen eines kräftigen zusammengesetzten Magnetes, dessen einzelne Pole je etwa 12,7 mm ($\frac{1}{2}$ Zoll) stark waren¹⁾. Der Rand der Scheibe war gut amalgamirt, um einen zuverlässigen schleifenden Contact zu erhalten; ein Theil um die Achse herum war ebenso vorgerichtet.

Streifen von Kupfer und Blei dienten als Stromsammler, die mit dem Rand der Scheibe in Berührung zu bringen waren; einer derselben wurde mit der Hand gegen den Rand der Scheibe zwischen den Magnetpolen gedrückt. Von den Zuleitungen zu einem Galvanometer war eine mit dem Sammlerstreifen verbunden, die andere mit der messingenen Achse der Scheibe; wurde nun die Scheibe gedreht,

1) Experimental Researches. Bd. 1, S. 25, Art. 85. Der Apparat wird noch in der Royal Institution aufbewahrt.

so erfolgte ein Ausschlag des Galvanometers, der sich umkehrte, sobald die Drehungsrichtung gewechselt wurde. Hiermit war die Erzeugung eines dauernden elektrischen Stromes mit Hilfe gewöhnlicher Magnete erwiesen. Die Wirkungen erhielt man ebenso von den Polen von Elektromagneten und von stromdurchflossenen Drahtspulen ohne Eisenkerne.

Noch verschiedene andere Formen magnetoelektrischer Maschinen wurden von Faraday versucht. Die eine¹⁾ bestand aus einem flachen Ringe von 12 Zoll äusserem Durchmesser und 1 Zoll (25,4 mm) Breite; der Ring war aus einer starken Kupferplatte geschnitten und so angeordnet, dass er zwischen den Polen eines Elektromagnetes in Umlauf versetzt werden konnte. Zwei Zuleitungen waren so angebracht, dass sie am inneren und äusseren Rande desjenigen Theiles, der sich zwischen den Polen befand, Schleifkontakte

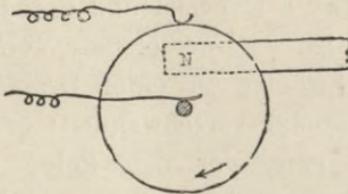


Fig. 1.
Scheibenmaschine von Faraday.

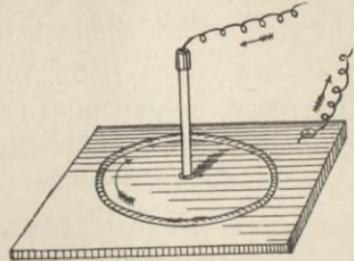


Fig. 2.
Kreisellapparat von Faraday.

bildeten. Bei einer anderen²⁾ Maschine war eine Kupferscheibe von $\frac{1}{5}$ Zoll (5 mm) Stärke und 1,5 Zoll (3,8 cm) Durchmesser am Rande amalgamirt und auf einer kupfernen Achse befestigt (Fig. 2). Ein quadratisches Stück Blech fasste in einem kreisförmigen Ausschnitt lose diese Scheibe, der Zwischenraum zwischen Scheibe und Blech war mit etwas Quecksilber ausgefüllt. Von dem Blech führte eine Zuleitung zu dem Galvanometer, die andere Zuleitung war mit der Achse verbunden. Lief die horizontale Scheibe um, so erhielt man Strom, obgleich nur die Erde als Magnet diente. Faraday brachte auch eine Vielfach-Maschine³⁾ mit mehreren Scheiben in Vorschlag, die abwechselnd an den Rändern und Mittelpunkten mit Hilfe von Quecksilber in leitender Verbindung standen; die Scheiben sollten abwechselnd in entgegengesetzter Richtung umlaufen.

1) *Experim. Researches*, Bd. 1, Art. 135.

2) *Ebenda*, Art. 155.

3) *Ebenda*, Art. 158.

Bei einer anderen Construction war ein an einem Ende geschlossener Kupfercylinder¹⁾ (Fig. 3) über einen Magnet gesetzt; die eine Hälfte des letzteren wurde wie von einem Hut umschlossen, beide Theile waren verbunden, ohne dass eine metallische Berührung stattfand. Das Ganze wurde dann aufrecht schwimmend in ein enges Gefäß mit Quecksilber gesetzt, so dass der untere Rand des Kupferhutes die Flüssigkeit berührte.

Wenn nun der Magnet und der Kupferhut gedreht wurden, ging ein Strom durch die Drähte von dem Quecksilber zum oberen Ende des Kupferhutes.

Bei einem anderen²⁾, noch in der Royal Institution aufbewahrten Apparat war ein cylindrischer Stabmagnet halb in Quecksilber ge-

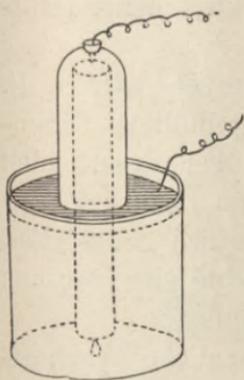


Fig. 3.
Umlaufender Kupfer-
cylinder von Faraday.

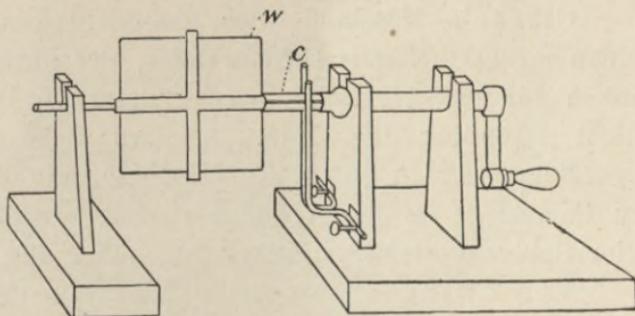


Fig. 4. Umlaufendes Rechteck von Faraday.

taucht. Wurde derselbe in Umlauf versetzt, so entstand ein Strom, für den der Stab selbst als Leiter diente. Eine andere Form³⁾ war so gebaut, dass ein cylindrischer Magnet sich um seine eigene Achse drehte; man entdeckte dann Ströme, die je nach der Drehungsrichtung von der Mitte nach den Enden oder umgekehrt flossen.

Die noch später von Faraday hergestellte Maschine⁴⁾ (Fig. 4) bestand aus einem Rechteck von Kupferdraht, das an einem Gestell befestigt wurde und um eine von Osten nach Westen gerichtete wagerechte Achse umlief. Die Maschine erzeugte Wechselströme, die man durch einen Stromwender abnehmen konnte.

1) Experim. Researches. Bd. 1, Art. 219.

2) Ebenda, Art. 220.

3) Ebenda, Art. 222.

4) Ebenda, Bd. 3, Art. 3192.

Von Dal Negro¹⁾ und von Pixii²⁾ wurden nahezu gleichzeitig auf Magnetoinduction beruhende Maschinen ersonnen. Bei der Maschine des letzteren dreht sich ein aufrechter Hufeisenmagnet um eine senkrechte Achse, wodurch in einem vor den aufwärtsstehenden Polen befindlichen Spulenpaar mit weichem Eisenkerne (Hufeisen) Wechselströme erzeugt werden.

Auf Anregung von Ampère stellte Pixii im Jahre 1832 eine zweite Maschine her³⁾, die mit Stromwendern zur Gleichrichtung der Wechselströme versehen war. Weitere Verbesserungen erfolgten durch Ritchie⁴⁾ und Watkins⁵⁾.

1833 erschien die Maschine von Saxton⁶⁾, zwei Jahre später die von Clarke⁷⁾; bei beiden Maschinen stand der Stahlmagnet in Hufeisenform fest, während der Anker — ein Elektromagnet (Hufeisen) mit einem Paar Spulen — sich drehte.

Clarke's Maschine wies besondere Einrichtungen auf, z. B. einen eigenthümlichen Stromwender, der kurze empfindliche Stromstöße für physiologische Zwecke lieferte. Der Anker drehte sich nicht gegenüber den Enden, sondern dicht an den flachen Seiten des Magnetes. In Saxton's Maschine, die der British Association zu Cambridge im Jahre 1833 vorgezeigt wurde, drehte sich der aus vier Spulen bestehende Anker gegenüber den Polen.

Von Ettinghausen stellte 1837 eine sehr ähnliche Wechselstrommaschine her, mit einem besonderen Stromabgeber⁸⁾, der die Ströme der einen von beiden abwechselnden Richtungen ausschloss.

Poggendorff⁹⁾ ersann 1838 einen besonderen Quecksilberstromwender für Saxton's Maschine, um den Mangel an Zusammenhang zwischen den Strömen (Discontinuität) zu vermindern.

Andere Verbesserungen am Stromwender sind Petrina¹⁰⁾ zuzuschreiben; Jacobi¹¹⁾ machte auf die Bedeutung kurzer Kerne im

1) Phil. Mag., Ser. 3, Bd. 1, S. 45. Juli 1832 (ein schwingender Apparat).

2) Ann. Chim. Phys., Bd. 50, S. 322. 1832.

3) Ebenda, Bd. 51, S. 76. 1832.

4) Phil. Mag., Ser. 3, Bd. 8, S. 455; Ser. 3, Bd. 10, S. 280. 1837; und Phil. Trans., Bd. 2, S. 318. 1833.

5) Phil. Mag., Ser. 3, Bd. 7, S. 107. 1835.

6) Ebenda, Ser. 3, Bd. 9, S. 360. 1836.

7) Ebenda, Ser. 3, Bd. 9, S. 262. 1836; Bd. 10, S. 365, 455. 1837; und Sturgeon's Ann. of Electr., Bd. 1, S. 145.

8) Gehler's Physik. Wörterbuch, Bd. 9. S. 122. 1838.

9) Pogg. Ann., Bd. 45, S. 385. 1838

10) Ebenda, Bd. 64, S. 58. 1845.

11) Ebenda, Bd. 69, S. 194. 1846.

Anker aufmerksam; Sturgeon¹⁾ brachte eine in der Längsrichtung zwischen die Schenkel eines Hufeisenmagnetes passende Spule an und erfand den einfachen zweitheiligen Stromwender oder den »unio-directive-discharger« (Entlader für gleiche Richtung), wie er ihn nannte. Störher²⁾ zeigte die Herstellung einer sechspoligen Maschine mit sechs Ankerspulen; Ritchie³⁾ wendet hohle Kerne und eine Doppelwicklung an; Pulvermacher⁴⁾ schlug 1849 die Verwendung dünner Eisenblätter zu den Kernen vor. Woolrich⁵⁾ ersann 1841 eine vielpolige Maschine mit doppelt so viel Spulen als Magnetpolen

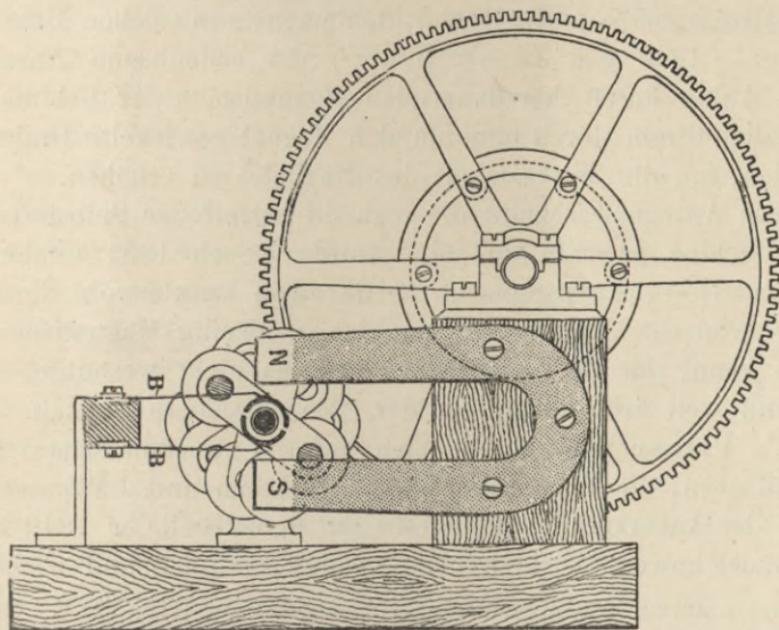


Fig. 5. Gleichstrommaschine von Wheatstone.

zu galvanoplastischen Zwecken. Wheatstone⁶⁾ begann mit seinen Verbesserungen 1841, und zwar mit einer Maschine, in der zum ersten Mal die Ankerspulen so angeordnet waren, dass ein ununterbrochener Strom erzeugt wurde (Fig. 5).

Zu diesem Zwecke waren fünf Anker, von denen jeder aus einem Paar kurzer paralleler cylindrischer Spulen mit Eisenkernen bestand

1) Ann. of Electr., Bd. 2, S. 1. 1838. Siehe auch Sturgeon's Scientif. Resear., S. 252, ebenso Phil. Mag., Ser. 3, Bd. 7, S. 231. 1835.

2) Pogg. Ann., Bd. 61, S. 417. 1844; Bd. 77, S. 467. 1849.

3) Englisches Patent [1849] Nr. 14899.

4) a. a. O.

5) Englisches Patent [1842] Nr. 9431.

6) Englisches Patent [1841] Nr. 9022.

und einen aus einer einfach gespaltenen Röhre bestehenden Stromwender besass, in einer Reihe längs einer Welle angeordnet mit sechs zusammengesetzten Stahlmagneten zwischen den Ankern, und zwar in derartiger Lage, dass bei der Drehung eine Spule nach der anderen die wirksamste Lage erreichte und nie in zweien gleichzeitig der Strom umgekehrt wurde. Sie waren hintereinander geschaltet durch Drähte, welche die positive Bürste — eine Metallfeder — der einen mit der negativen Bürste der nächsten verbanden. Im Jahre 1845 liessen sich Wheatstone¹⁾ und Cooke die Benutzung von Elektromagneten an Stelle der Stahlmagnete in solchen Maschinen patentiren. 1848 gab Jacob Brett²⁾ die bedeutsame Anregung, den im Anker durch den dauernden Magnetismus der Feldmagnete entwickelten Strom durch eine um den Magnet gewickelte Drahtspule zu senden, um die Wirksamkeit des Magnetes zu erhöhen.

Diese Anregung scheint die erste in betreff der Selbsterregung einer Maschine gewesen zu sein, wurde jedoch 1851 unabhängig auch von Sinsteden³⁾ gemacht. Sinsteden kannte wohl die durch Müller erforschte Thatsache, dass Stahl zeitweilig Magnetismus annehmen kann, der dem des Schmiedeeisens nicht wesentlich nachsteht und weit grösser ist, als der, den er dauernd behält. Sinsteden's Untersuchungen, die sich auf die zweckmässigste Grösse der Polflächen, die Verwendung von Polstücken und die Zusammensetzung der Ankerkerne aus Blättern (an deren Stelle er 1849 Eisen-drahtbündel anwendete) erstreckten, waren zahlreich und wichtig.

Eine ganz andere Maschinenform wurde von Ritchie⁴⁾, Page⁵⁾ und Dujardin⁶⁾ unabhängig voneinander angegeben. In dieser drehte sich weder ein Feldmagnet noch eine Wickelung; die inducirten Wickelungen lagen auf Polansätzen der Feldmagnete; vor den Ansätzen wurden Stücke weichen Eisens in Drehung versetzt, die schnelle periodische Aenderungen des magnetischen Feldes bewirkten. Auf derselben Grundlage des »Inductors« oder »Ankers« beruhende Maschinen wurden später von Holmes, Henley, Wheat-

1) Englisches Patent [1845] Nr. 10655.

2) Englisches Patent [1848] Nr. 12054.

3) Pogg. Ann, Bd. 84, S. 186. 1851. Ueber Sinsteden's andere Forschungen vergleiche ebenda Bd. 76, S. 29, 195 und 524. 1849; Bd. 84, S. 181. 1852; Bd. 92, S. 1 und 220. 1854; Bd. 96, S. 353. 1855; Bd. 137, S. 290 und 483. 1869.

4) Phil. Mag., Ser. 3, Bd. 10, S. 280. 1837.

5) Ann. of Electric., S. 489. 1839.

6) Compt. Rend., Bd. 18, S. 837. 1844; Bd. 21, S. 528 und 892. 1881.

stone, Wilde und Sawyer, vom Verfasser und von Kingdon angegeben.

Nollet¹⁾ ersann 1849 eine Wechselstrommaschine, deren Construction er mit Van Melderer ausführte; nach dem Tode von Nollet entwickelte sich aus dieser Maschine zuerst unter Mithilfe von Holmes, dann von Masson und du Moncel die »Alliance«-Maschine²⁾, die von 1863 an für die französischen Leuchthürme benutzt wurde.

Holmes setzte die Verbesserungen seiner Arbeit fort und stellte eine schöne Maschine³⁾ her, der von Faraday 1857 grosses Lob gespendet wurde.

Die von Holmes auf der internationalen Ausstellung 1862 gezeigte grosse Maschine mit einem grossen Stromwender und umlaufenden Walzen für die Bürsten lieferte ununterbrochenen Strom; 160 Spulen waren an dem Umfange von zwei Rädern von je 2,74 m (9 Fuss) Durchmesser angeordnet. 60 Hufeisenmagnete standen in drei Kreisen, so dass jeder Kreis 40 radiale Pole besass. 1867 baute Holmes das Modell um; er wählte Feldmagnete von grösseren Abmessungen und unterliess die Gleichrichtung der Ströme; 1869 benutzte er die gleichgerichteten Ströme einiger Spulen zur Erregung der Feldmagnete.

In der damaligen Periode wurde überhaupt grosse Thätigkeit entwickelt. 1855 wurde Hjorth⁴⁾ eine bemerkenswerthe Maschine patentirt. Um den Anfangsstrom hervorzubringen, besass sie eine Anzahl von Dauermagneten als Feldmagnete, daneben kräftige Elektromagnete, die durch den Maschinenstrom selbst erregt wurden.

1856 wurde die durch Werner Siemens⁵⁾ erfundene berühmte längs des Ankers liegende Wickelung patentirt (der sogen. I-Anker). 1859⁶⁾ regte er an, den Kern allein zu drehen, während die Spulen in Rinnen der Polstücke von Feldmagneten fest lagen.

1) Vergl. Englisches Patent [1850] Nr. 13302. Ebenso Douglass in Proc. Inst. Civ. Engin., Bd. 57, 1878 bis 1879.

2) Vergl. Du Moncel, Exposé des Applic. de l'Electric., Bd. 1, S. 361; ebenso Le Roux, Bull. de la Société d'Encouragement 1868.

3) Vergl. Douglass, l. c. Ebenso Englisches Patent [1856] Nr. 573; [1868] Nr. 2060; [1869] Nr. 1774.

4) Englisches Patent [1848] Nr. 12295; [1854] Nr. 2199; [1854] Nr. 2198; [1855] Nr. 806, 807 und 808.

5) Englisches Patent [1856] Nr. 2017. Vergl. auch Pogg. Ann., Bd. 101, S. 271. 1857.

6) Englisches Patent [1859] Nr. 512.

Wilde¹⁾ aus Manchester brachte in den Jahren 1861 bis 1867 eine bemerkenswerthe Reihe von Untersuchungen. Er begann mit kleinen Apparaten für telegraphische Zwecke; 1863 ersann er eine Maschine mit Siemens'schem Anker zwischen den Polen eines kräftigen Elektromagnetes, der durch eine Hilfsmaschine — mit Siemens'schem Anker und Dauermagnet — angeregt wurde. Die Erregermaschine war auf der erstgenannten Maschine angebracht.

1866/67 erfand Wilde Wechselstrommaschinen; die letzte Art besass eine Anzahl von Spulen auf dem Umfange einer Scheibe, die sich zwischen zwei gegenüberstehenden Kränzen abwechselnd polarisirter Feldmagnete drehte; diese Art wird noch jetzt benutzt. Ursprünglich wurden derartige Maschinen durch eine kleine Magnetomaschine besonders angeregt; 1873 wurden sie selbsterregend hergestellt, indem mittels eines Stromwenders Ströme aus einer oder mehreren Ankerspulen entnommen wurden.

Die Einrichtung, den ganzen Strom oder einen Theil des Stromes zur Erregung der Feldmagnete zu verwenden, wurde zu jener Zeit wieder bekannt; wie schon früher erwähnt, hatten bereits Brett, Sinstedden und Hjorth davon Gebrauch gemacht.

Der Patentagent eines auswärtigen Erfinders, Johnson²⁾, sagt: Es wird beabsichtigt, den Elektromagnet zur Erzeugung inducirter Elektrizität zu benutzen, die ganz oder theilweise die nothwendige Elektrizität zur Polarisirung der Elektromagnete liefert, und sonst aus Batterien oder anderen bekannten Quellen entnommen werden müsste.

Murray³⁾ erklärte im Juli 1866, dass er einige um die Feldmagnete seiner Magnetmaschine gewickelte Spulen mit der Ankerwicklung hintereinander geschaltet habe und empfahl die Benutzung dieser Einrichtung. Im Oktober des Jahres 1866 schrieb Moses G. Farmer⁴⁾ an Wilde in Manchester und erläuterte den Erfolg, den er mit der Einschaltung von Feldmagnetwickelungen in den Hauptstromkreis in der Absicht erzielt habe, die Magnete der Maschine durch diesen zu erregen. Im November 1866 erklärte Baker⁵⁾, dass die secundären Ströme aus den umlaufenden Magneten zur Erregung der feststehenden Magnete verwendet werden könnten.

1) Englisches Patent [1861] Nr. 299, 858, 1994 und 2997; [1863] Nr. 516 und 3006; [1865] Nr. 1412 und 2753; [1866] Nr. 3209 und [1867] Nr. 824.

2) Englisches Patent [1885] Nr. 2670.

3) Vergl. Engineer, 20. Juli 1866. S. 42.

4) Proc. Lit. and Phil. Soc. of Manchester, Bd. 6, S. 107.

5) Englisches Patent [1866] Nr. 3039.

Im Dezember desselben Jahres machten C. und S. A. Varley¹⁾ Angaben über eine Maschine, die nur mit Elektromagneten versehen war. Dieselbe erforderte jedoch einen geringen Grad von dauerndem Magnetismus, indem die Erfinder erwähnen, dass die Spulen bei dem Durchgang zwischen den Polen der Dauermagnete schwach magnetisirt würden. Es ist zu vermuthen, dass dieser Magnetismus von einem durch die Spulen der Elektromagnete fließenden Strome erzeugt wurde. Diese Anordnung erscheint auch bei einer anderen, denselben Erfindern im Juni 1867, ebenso bei einer weiteren O. und F. H. Varley im Jahre 1869 patentirten Maschine. Die Elektromagnete der Maschine aus dem Jahre 1867 waren mit zwei getrennten Wickelungen versehen, die abwechselnd mit Strömen durch zwei Stromwender versorgt wurden. Die Ströme wurden zwei besonderen Spulenpaaren entnommen.

1868 und 1871 setzte S. A. Varley seine Bemühungen zur Verbesserung der magnetoelektrischen Maschinen fort. 1876 kam er auf die Selbsterregung zurück und verwendete eine Vielfach-Spulen-anordnung, bei der jede Spule der Reihe nach während eines Theiles der Drehung ausgeschlossen wurde. Die Maschine besass auch zwei Wickelungen auf den Feldmagneten, die eine von höherem Widerstand als die andere, beide waren mit dem äusseren Stromkreis verbunden; der Stromkreis der ersteren war beständig geschlossen. Es war indessen nicht klar, dass diese Art der Doppelwicklung dieselbe ist, die man gegenwärtig Verbundwicklung oder gemischte Wickelung²⁾ nennt, bis dies 15 Jahre später durch einen schottischen Richter gesetzlich festgestellt wurde.

Dr. Werner Siemens³⁾ erläuterte am 17. Januar 1867 vor der Berliner Akademie der Wissenschaften eine Maschine zur Erzeugung elektrischer Ströme mittels mechanischer Kraft; die Ströme wurden in der Wickelung eines sich drehenden Ankers durch elektromagnetische Einwirkung inducirt; der Strom selbst erregte den Elektromagnetismus.

Der anfängliche Dauermagnetismus wurde auch dadurch erzeugt, dass zunächst aus einer Batterie ein Strom durch die Wickelung geleitet wurde.

1) Englisches Patent [1866] Nr. 3394. Siehe auch [1867] Nr. 1755, [1868] Nr. 315, [1871] Nr. 131 und 1150, [1876] Nr. 4905, [1877] Nr. 270 und 4435 und [1878] Nr. 4100.

2) Vergl. Phil. Mag., Ser. 4, Bd. 45, S. 439. 1873.

3) Berliner Berichte, Januar 1867: Proc. Roy. Soc. 14. Februar 1867; Englisches Patent [1867] Nr. 261; Pogg Ann., Bd. 130, S. 332. 1867.

Um die Bedeutung dieses Vorganges zu kennzeichnen, wendete Siemens¹⁾ den Ausdruck »dynamoelektrische Maschine« an, eine Benennung, die auch in den Formen »Dynamomaschine« und abgekürzt »Dynamo«²⁾ für alle durch mechanische Kraft betriebenen elektrischen Maschinen gebraucht wird, gleichgültig, ob sie selbsterregende sind oder nicht.

An demselben Tage, an dem diese Erfindung der Royal Society mitgeteilt wurde (14. Februar 1867), trug Sir C. Wheatstone³⁾ eine Abhandlung vor, die eine fast gleiche Anregung enthielt; der Unterschied bestand darin, dass nach dem Vorschlage von Siemens die Erregerwicklung mit der Ankerwicklung in dem Hauptstromkreise

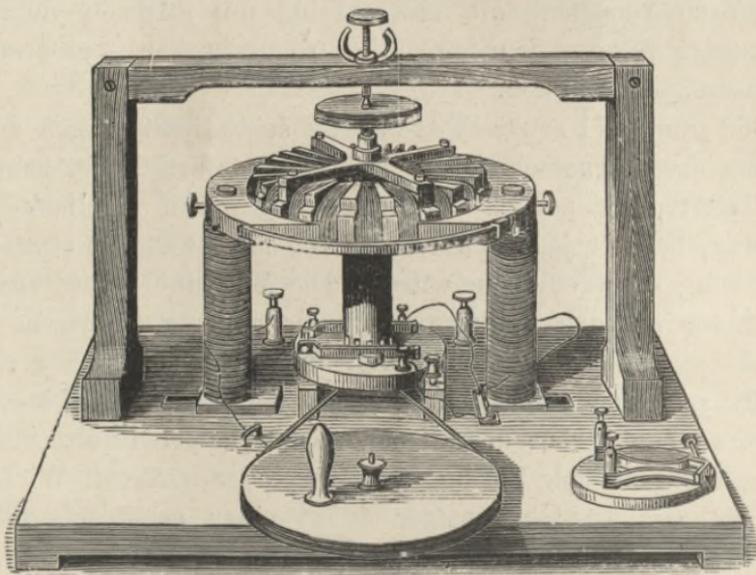


Fig. 6. Maschine von Pacinotti.

hintereinander geschaltet werden sollte, während Wheatstone die erstere in einen Nebenschluss legen wollte.

Eine selbsterregende Maschine ohne Dauermagnete wurde übrigens für Wheatstone durch Stroh im Sommer 1866 hergestellt.

Ladd⁴⁾ stellte 1867 eine selbsterregende Maschine mit zwei Siemens'schen Anker (Längswicklungen), einem kleineren zur

1) W. Siemens, Wissenschaftliche und technische Arbeiten. Bd. 1, 2. Aufl. 1889. S. 208. — Lebenserinnerungen, 1892. S. 253.

2) Sprachlich ist diese Bezeichnung widersinnig, ebenso gut könnte man „Dampf“ anstatt „Dampfmaschine“ sagen. Der Uebers.

3) Proc. Roy. Soc. 14. Februar 1867.

4) Phil. Mag., Ser. 4, Bd. 33, S. 544. 1867.

Erregung des gemeinschaftlichen Feldmagnetes und einem grösseren zur Stromlieferung für Beleuchtungszwecke, aus.

Mittlerweile war die Frage, wie Gleichströme mit geringen Schwankungen der Stärke zu erhalten seien, aufgekommen; Pacinotti¹⁾ gab eine Lösung, die, obwohl zeitweilig der Vergessenheit anheimgefallen, als eine sehr verdienstvolle wieder anerkannt worden ist. Seine zuerst im Jahre 1864 beschriebene Maschine besitzt als Anker einen Elektromagnet in Gestalt eines Ringes; den Kern bildet ein gezahntes eisernes Rad zwischen dessen Zähnen die Wickelungen

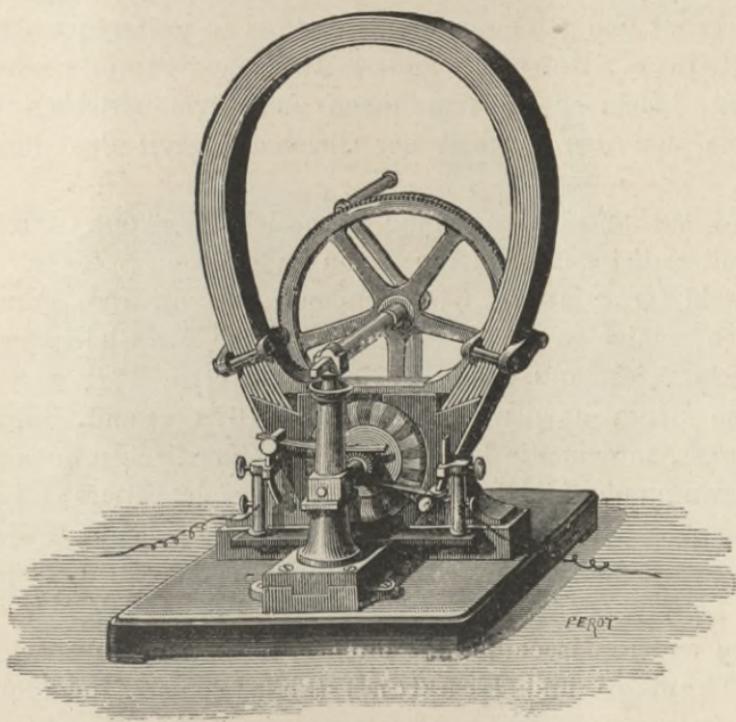


Fig. 7. Maschine von Gramme. Laboratoriumsmuster.

in 16 getrennten Abtheilungen aufgewunden sind. Er bezeichnete diese Anordnung als »Transversal-Elektromagnet«. Die Wickelung bildete einen geschlossenen Kreis; wurde zu irgend einem Punkte ein Strom geleitet, so floss er nach beiden Richtungen bis zu dem Punkte, wo er durch die Rückleitung abgenommen wurde.

Indem nun zwischen 16 verschiedenen Punkten am Ringe und ebensoviel isolirten Metallstücken, welche als Stromwender oder Stromabgeber dienten, Verbindungen bestanden, wurde es möglich, in beliebigen Punkten des Ringes magnetische Pole auftreten zu lassen.

1) Nuovo Cimento, Bd. 19, S. 378. 1865.

Die ununterbrochene Wickelung, welche aus getrennten, um einen Ring oder einen anderen Drehungskörper symmetrisch gelegten Abtheilungen bestand, wurde unabhängig im Jahre 1870 durch Gramme¹⁾ erfunden. Der von ihm hergestellte Ring war nicht gezahnt, sondern vollständig mit Draht überwickelt. Wenn ein Anker mit einer Anzahl symmetrisch gruppierter Wickelungen, die der Reihe nach das magnetische Feld durchlaufen, versehen wird, so erhält man Ströme, die für die Praxis als gleichmässig anzusehen sind. Die Einführung des Gramme'schen Ringankers wurde rasch als bedeutender Fortschritt erkannt und gab einen neuen Anstoss zu weiteren Erfindungen.

v. Hefner-Alteneck²⁾ änderte 1873 die Siemens'sche Längswickelung, indem er die Windungen unter symmetrischen Winkeln aufbrachte, um den Vortheil der Gleichmässigkeit des Stromes zu erzielen.

1874 suchte Lontin³⁾ eine ebensolche Wirkung durch einen Anker mit radial angeordneten Polen zu erzielen.

Sowohl Gramme als Siemens erfanden mehrere Formen von Maschinen, einige für Wechselstrom⁴⁾, einige für Gleichstrom. Die Nebenschlusswickelung wurde 1875 von Bertin, 1879 von Brush, 1880 von Siemens⁵⁾ wieder benutzt. 1878 erfand Pacinotti⁶⁾ einen Anker, in dem die Leiter die Form einer flachen Scheibe bzw. eines Schwungrades bildeten. Gleichzeitig wendete Brush⁷⁾ bei seiner berühmten Maschine die offene Wickelung an; er benutzte die gleichzeitige Nebenschluss- und Reihenschaltung der Feldmagnetwindungen, um die Leistung der Maschine ändern zu können.

Eine andere Maschine mit offener Wickelung wurde 1880 von Elihu Thomson und Houston⁸⁾ (Philadelphia) eingeführt. Um dieselbe Zeit ersann Weston⁹⁾ verschiedene Maschinenformen und verbesserte besonders die Nebenschlussmaschinen. Noch viele andere amerikanische Erfinder stellten Maschinen her, unter ihnen auch

1) Compt. Rend., Bd. 73, S. 175. 1871, und Bd. 75, S. 1497. 1872; auch Englisches Patent [1870] Nr. 1668.

2) Englisches Patent [1873] Nr. 2006. Im vorhergehenden Jahre wurde durch Worms de Romilly eine ähnliche Anordnung angegeben.

3) Englisches Patent [1875] Nr. 473; [1876] Nr. 386 und 3264.

4) Englisches Patent, Gramme [1878] Nr. 953; Siemens [1878] Nr. 3134.

5) Phil. Trans. März 1880.

6) Nuovo Cimento, Ser. 3, Bd. 1. 1881.

7) Englisches Patent [1878] Nr. 2003.

8) Englisches Patent [1880] Nr. 315.

9) Englisches Patent [1876] Nr. 4280; [1882] Nr. 1614 und 2194.

Edison¹⁾. Dieser trat 1878 zuerst mit einer Maschine hervor, die keine drehende, sondern eine schwingende Bewegung besass; dieselbe Einrichtung hatten schon 1856 Dujardin²⁾, 1859 Siemens³⁾, 1861 Wilde⁴⁾ versucht, aber wieder verlassen. Auch Edison ging 1879 zu einer etwas veränderten Hefner-Alteneck'schen Ankerform über und wendete einen verlängerten Elektromagnet mit Nebenschlusswicklung an. 1881 stellte er eine Scheibenmaschine nach Art von Pacinotti's Scheibe her.

Dasselbe Jahr brachte neue Wechselstrommaschinen von Lord Kelvin (Sir W. Thomson⁵⁾ und Gordon⁶⁾ (unabhängig davon durch Ferranti angegeben).

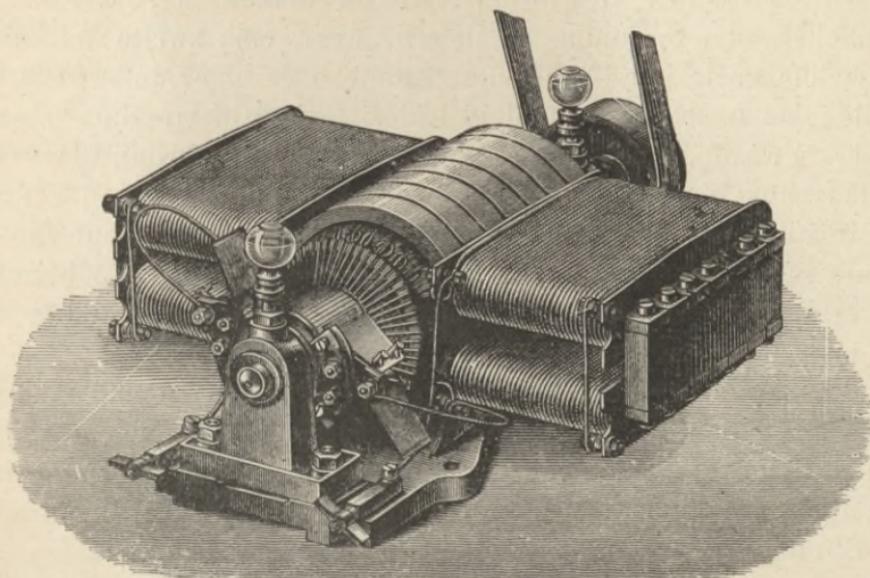


Fig. 8. Maschine von Siemens mit Trommelanker von Hefner-Alteneck.

Um diese Zeit kamen die vielpoligen Maschinen in Aufnahme. Lord Elphinstone⁷⁾ und Vincent führten den vielpoligen Trommelanker ein, Schuckert, Gramme, Gülcher, sowie Mordey⁸⁾ benutzten unabhängig voneinander den vielpoligen Ring.

1) Englisches Patent [1878] Nr. 4226, [1879] Nr. 2402, [1881] Nr. 1240 und 2954 und [1882] Nr. 2052.

2) Vergl. Du Moncel, Exposé des Applic., Bd. 1, S. 372.

3) Englisches Patent [1859] Nr. 512.

4) Englisches Patent [1861] Nr. 924.

5) Englisches Patent [1881] Nr. 5668.

6) Englisches Patent [1881] Nr. 5536 und [1882] Nr. 2871.

7) Englisches Patent [1879] Nr. 332 und [1880] Nr. 2893.

8) Englisches Patent [1883] Nr. 400.

Besonders Elphinstone wandte seine Aufmerksamkeit der Vervollkommnung des magnetischen Kreises zu; seine Maschine veraltete indessen bald aus rein mechanischen Gründen.

Hopkinson¹⁾ wies nach, wie die Leistung einer Maschine bedeutend erhöht werden kann, wenn man den magnetischen Kreis verbessert und gedrängter macht, während Crompton²⁾ (ausser einer Anzahl von Verbesserungen an Einzeltheilen) den Vortheil zeigte, den die Vergrösserung des Eisenquerschnittes im Ankerkerne hervorbringt.

Im Jahre 1881 führten theoretische Erwägungen Marcel Deprez³⁾ zu der Folgerung, dass eine Dynamomaschine bei einer gewissen kritischen Geschwindigkeit im Stande sei, Ströme von gleichbleibender Spannung zu liefern, wenn eine zweite Wickelung der Feldmagnete mit Hilfe einer Batterie oder einer anderen Stromquelle eine unabhängige und gleichbleibende Hilfserrögen bewirkt. Dieser Erwägung folgte fast unmittelbar die Einführung der sogen. »Compound«-Wickelung (gemischte oder Verbundwickelung), um eine selbstregulirende Maschine zu erhalten. Der Anspruch auf die genannte Einrichtung gab zu Streitigkeiten Anlass. Seit 1883 betreffen die erzielten Verbesserungen Einzelheiten in der Anordnung und der mechanischen Ausführung.

Von Siemens und Halske, von C. E. L. Brown und Anderen wurden grosse vielpolige Maschinen erbaut, die erfolgreich arbeiteten. Von Desroziere und von Fritsche wurden Scheibenmaschinen eingeführt. Besondere Mittel der Construction, welche die Funken am Stromwender vermindern oder beseitigen sollen, wurden von Ryan und J. Sayers angegeben. Gewaltige Wechselstrommaschinen erbauten Ganz, Ferranti und Mordey; die Maschine von Mordey zeigt eine bemerkenswerthe Verbesserung in der Hinsicht, dass als Feldmagnet ein einziger gedrängter magnetischer Kreis benutzt wird. Mehrphasige Wechselstrommaschinen wurden, hauptsächlich seit 1891, eingeführt zur Erzeugung von zwei oder mehr Wechselströmen, die untereinander in der Phase verschieden waren; der Zweck dieser Maschinen war, Strom zur Kraftübertragung und -Vertheilung mittels mehrphasiger Motoren zu erzeugen. Ganz neuerdings scheint der Wechselstromerzeuger mit eisernem Anker und ohne Kupfer in dem beweglichen Theil wieder aufzukommen.

1) Englisches Patent [1883] Nr. 973.

2) Englisches Patent [1882] Nr. 2618 und 4810 und [1884] Nr. 4302.

3) Lum. electr., 3. December 1881 und 5. Januar 1884.

Den elektrischen Motor können wir bis zur Entdeckung der elektro-magnetischen Drehung durch Faraday¹⁾ (1821) und der Erfindung des umlaufenden Rades von Barlow²⁾ (1823) verfolgen.

Die ersten elektrischen Motoren, bei denen die Anziehung durch einen Elektromagnet angewendet wurde, waren die von Henry³⁾ (1831) und von Dal Negro⁴⁾ (1832); es folgten 1833 und 1834 die Apparate von Ritchie⁵⁾ und Jacobi⁶⁾, 1837 der von Davenport⁷⁾. Von vielen Anderen, die derartige Maschinen herstellten, mögen noch als die bekanntesten Page⁸⁾ (Vereinigte Staaten von Amerika), Wheatstone⁹⁾ (England), Froment¹⁰⁾ (Frankreich) und Pacinotti¹¹⁾ (Italien) genannt werden.

Die Entdeckung, dass die Thätigkeit einer Dynamomaschine die einfache Umkehrung derjenigen eines Elektromotors sei und dass ein und dieselbe Maschine auf beide Weise zu benutzen ist, scheint 1838 von Lenz¹²⁾ gemacht worden zu sein. Sie war 1850 Jacobi¹³⁾ bekannt, obgleich sie etwas später erst zur allgemeinen Anerkennung gelangte. Sie musste bestimmt schon 1852 bekannt sein, denn in der vierten Auflage von Davis' Magnetismus (erschienen zu Boston) wird ein »umlaufender Magnet« (eine unbedeutende Nachbildung von Ritchie's Motor) beschrieben; dieser Apparat zeigt sich auf Seite 212 als Triebwerk und auf Seite 268 wieder als Stromerzeuger. Der Beschreibung ist die Bemerkung beigefügt, dass ein jeder elektromagnetische Apparat, der durch die Wechselwirkung eines Batteriestromes und eines Stahlmagnets in Bewegung gesetzt

1) Journ. of Royal Instit., September 1821.

2) Barlow, On Magn. Attract. (1823), S. 279 und Encyclop. Metropol. (1824), IV. Art. Electromagnetism. S. 36.

3) Silliman's Journ., Bd. 20, S. 340. 1831. Vergl. auch Henry, Scientific Writings (1886), Bd. 1, S. 54.

4) Annali delle Scienze Lombardo-Veneto, März 1834.

5) Phil. Transact. 1833, Bd. 2, S. 318.

6) L'Institut., Bd. 82. Dezember 1834.

7) Vergl. Ann. of Electric., Bd. 2. 1838; Encyclop. Britann. (Ed. VII) Art. Voltaic Electricity, S. 687.

8) Silliman's Journ., Bd. 33. 1838; und Ser. 2, Bd. 10, S. 344 und 473. 1850.

9) Englisches Patent [1841] Nr. 9022.

10) Vergl. Cosmos, Bd. 10, S. 495. 1857; und Lum. élect. Bd. 9, S. 193. Juni 1883.

11) Nuovo Cimento, Bd. 19, S. 378. 1865.

12) Sturgeon's Annals of Electricity, Bd. 3, S. 384. 1838; Pogg. Ann., Bd. 31, S. 483. 1838.

13) Mém. sur la théorie des Machines électromagnétiques.

werden kann, einen magnetoelektrischen Strom liefert, wenn er mechanisch bewegt wird.

Walenn¹⁾ bestätigte dies ausdrücklich im Jahre 1860, ebenso Pacinotti 1864. Das Prinzip der Arbeitsübertragung von einer Maschine, die als Stromerzeuger wirkt, zu einer als Triebwerk benutzten Maschine ist zuerst von Fontaine und Gramme angegeben und in Wien im Jahre 1873 vorgeführt worden. Ohne den Schatten eines Beweises wurde die Sache mit Lärm für Marcel Deprez²⁾ in Anspruch genommen, obgleich er bis 1881 nichts Derartiges erfand.

Von Ayrton und Perry rührt die wichtige Erfindung der selbstthätigen Regulirung von Elektromotoren zur Erhaltung der gleichbleibenden Umdrehungsgeschwindigkeit her (1882). Die Methoden dazu sind mit den für die Selbstregulirung einer Dynamomaschine benutzten verwandt, jedoch deren Umkehrung. Von dieser Zeit an betreffen die Verbesserungen an Motoren für Gleichstrom die mechanische Ausführung, sowohl was die gesammte Anordnung, als auch was Einzeltheile angeht.

Die Wechselstrommaschine bildet keinen geeigneten Motor, weil sie nicht von selbst angeht. Befindet sie sich aber in Bewegung, so läuft sie genau synchron mit dem Stromerzeuger. 1879 zeigte Bailey, dass eine Kupferscheibe, die in ein regelmässig gedrehtes magnetisches Feld gebracht wird, selbst in Drehung geräth. Im Jahre 1888 machte Ferraris die wichtige Entdeckung, dass man einen Elektromotor mit zwei unabhängigen Wechselströmen von gleicher Periode, aber von verschiedener Phase in Umlauf setzen kann, indem dann ein umlaufendes magnetisches Feld entsteht. Nicola Tesla machte unabhängig und fast gleichzeitig dieselbe Entdeckung. Seitdem sind viele Formen von Motoren mit umlaufenden Feldern angegeben worden; verschiedene Erfinder, darunter von Dolivo-Dobrowolsky, C. E. L. Brown u. A. haben den Inductionsmotor zu einem hohen Grade der Vollkommenheit gebracht. In den Vereinigten Staaten wurde ein hiervon durchaus verschiedener Zweiphasen-Motor von Stanley und Kelley ausgebildet. Der Erfolg dieser Mehrphasenmotoren, deren drehbarer Theil vom Stromkreis ganz unabhängig, einfach aus Eisen und Kupfer gebaut ist und seinen Strom durch Induction und ohne Stromwender und leitende Verbindungen empfängt, hat zur Erbauung von Einphasen-

1) Englisches Patent [1860] Nr. 2587.

2) Englisches Patent [1882] Nr. 2830. Vergl. Journ. Soc. Electr. Engineers, Bd. 12, S. 301. 1883.

motoren für gewöhnlichen Wechselstrom geführt; diese Motoren gleichen den Mehrphasenmotoren darin, dass der drehbare Theil seinen Strom nur durch Induction empfängt.

Die Entwicklung der Theorie der Dynamomaschine geht bis auf Weber's¹⁾ und Neumann's²⁾ Forschungen über die allgemeinen Gesetze der magnetoelektrischen Induction zurück.

Diesen folgten Jacobi's³⁾ Berechnungen und Versuche über die Leistung eines elektrischen Triebwerkes, Poggendorff's⁴⁾ und Koosen's⁵⁾ Forschungen über die Theorie der Saxton'schen Magnetomaschine; ferner die Untersuchungen von Lenz⁶⁾, Joule⁷⁾, Le Roux⁸⁾ und Sinsteden⁹⁾. Ein langer Zeitraum verging bis zu den Untersuchungen, die Favre¹⁰⁾ veröffentlichte, und in den folgenden 20 Jahren wurde das Schweigen über diesen Gegenstand nur durch eine kleine, fast ganz vergessene Abhandlung von Clerk Maxwell¹¹⁾ über die Theorie selbsterregender Maschinen unterbrochen.

Mit dem Wiederaufleben des elektrischen Lichtes wurde die Theorie der Dynamomaschine weiter erforscht; wichtige Beiträge dazu wurden von Mascart¹²⁾, Hagenbach¹³⁾, von Waltenhofen¹⁴⁾, Hopkinson¹⁵⁾, Herwig¹⁶⁾, Meyer und Auerbach¹⁷⁾, sowie von Joubert¹⁸⁾ geliefert. Der Letztere begründete die neue Theorie der Wechselstrommaschinen.

1) Elektrodyn. Maassbest. (1846).

2) Berl. Berichte 1845, S. 1 und 1847, S. 1.

3) Pogg. Ann., Bd. 51, S. 370. 1840; Bd. 69, S. 181. 1846; Krönig's Journ., Bd. 3, S. 377. 1851. Auch Ann. Chim. Phys., Ser. 3, Bd. 34, S. 451. 1852.

4) Pogg. Ann., Bd. 45, S. 390. 1838.

5) Ebenda, Bd. 85, S. 226; Bd. 87, S. 386. 1852.

6) Ebenda, Bd. 31, S. 483. 1834; Bd. 34, S. 385. 1835; Bd. 92, S. 128. 1854.

7) Ann. of Electr., Bd. 4. 5. 1839, 40; Phil. Mag, Ser. 3, Bd. 23, S. 263, 347 und 435. 1843.

8) Ann. Chim Phys., Ser. 3, Bd. 50, S. 463. 1857.

9) Pogg. Ann., Bd. 84, S. 181. 1851.

10) Compt. Rend., Bd 36, S. 342. 1853; Bd. 39, S. 1212. 1854; Bd. 46, S. 337, 658. 1858.

11) Proc. Roy. Soc. 14. März 1867; Phil. Mag, Ser. 4, Bd. 33, S. 474. 1867.

12) Journ. de Phys., Bd. 6, S. 204, 297. 1877; Bd. 7, S. 89. 1878.

13) Arch. de sciences phys., Bd. 55, S. 255. März 1876; Pogg. Ann, Bd. 158, S. 599. 1876.

14) Wiener Berichte, Bd. 80, S. 601. 1879.

15) Proc. Inst. Mech. Engineers 1879, S. 238 und 1880, S. 266.

16) Wiedem. Ann., Bd. 7, S. 193. 1879.

17) Ebenda, Bd. 8, S. 494. 1880.

18) Ann. de l'Ecole Norm., Bd. 10, S. 131. 1881; Journ de Phys., Ser. 2, Bd. 2, S. 293. 1883.

Hopkinson¹⁾ ersann die graphische Darstellung der Beziehung zwischen Strom und der wirksamen elektromotorischen Kraft der Maschine; derartige Curven bildeten unter der Bezeichnung »Charakteristiken« die Grundlage der theoretischen Forschungen von Marcel Deprez²⁾.

Im Jahre 1880 begann Frölich³⁾ eine Reihe sowohl auf Versuche gegründeter als theoretischer Forschungen, deren Ergebniss Gleichungen von bemerkenswerther Einfachheit waren, wenn sie auch nur einen Näherungswerth ergaben.

Clausius⁴⁾ entwickelte, auf der Grundformel Frölich's für das Gesetz des Elektromagnets fussend, mit grosser Sorgfalt eine Theorie, die alle verschiedenen secundären Wirkungen bei Stromerzeugern in Betracht zog; später erweiterte er diese Theorie für den Fall, dass eine Maschine als Triebwerk dient.

1886 veröffentlichten John und Edward Hopkinson⁵⁾ eine bedeutsame Abhandlung, worin sie, von theoretischen Betrachtungen über die Induction des Magnetismus in einem magnetischen Kreise gegebener Form und gegebenen Materiales ausgehend, eine Theorie der Dynamomaschine entwickelten. Die grosse Brauchbarkeit ergibt sich aus der Thatsache, dass es mit Hilfe dieser Theorie möglich ist, die Leistung einer Maschine mit ausserordentlicher Genauigkeit aus dem durch die Werkzeichnungen gegebenen genauen Entwürfe vorherzubestimmen.

Weitere Beiträge zur Theorie der Dynamomaschinen haben Lord Kelvin⁶⁾ (Wickelungen zur Erzielung des grössten Wirkungsgrades), Kapp⁷⁾ (Vorherbestimmung der charakteristischen Curve), Rücker⁸⁾ (Grenzen der Selbstregulirung), Esson⁹⁾ (Entwurf vielpoliger Maschinen) u. A. geliefert. Hering¹⁰⁾, Fritsche¹¹⁾ und

1) Proc. Instit. Mech. Engineers 1879, S. 238.

2) Compt. Rend., Bd. 92, S. 1152. 1881; Lum. electr., Bd. 15, S. 1. 1885.

3) Berlin. Berichte 1880, S. 962; Elektrot. Ztschr., Bd. 2, S. 134, 170. 1881; Bd. 6, S. 128 u. f. 1885; Bd. 9, November 1888.

4) Wiedem. Ann., Bd. 20, S. 353. 1883; Bd. 21, S. 385. 1884; Phil. Mag., Ser. 5, Bd. 17, S. 49 und 119. 1884.

5) Phil. Trans. 1886, Bd. 1, S. 331.

6) Journ. de Phys., Ser. 2, Bd. 2, S. 240. 1887; Compt. Rend., Bd. 93, S. 474. 1881.

7) Journ Soc. Electr. Engineers, Bd. 15, S. 518. 1887.

8) Phil. Mag., Ser. 5, Bd. 19, S. 462. Juni 1885.

9) Journ. Inst. Electr. Engin., Bd. 20. 1891.

10) Hering's Principles of Dynamo-Electric Machines, New York 1889.

11) Fritsche, Die Gleichstrom-Dynamomaschine, Berlin 1889.

Arnold¹⁾ veröffentlichten Studien über die Wirkung der Anker; von dem zuletzt Genannten stammt eine Formel für alle Arten von Gleichstrommaschinen mit geschlossener Ankerwicklung. Methoden zur Zergliederung der verschiedenen Energieverluste durch Reibung, Hysteresis und Wirbelströme sind von Mordey²⁾ und später unabhängig von Kapp³⁾ und Housmann⁴⁾ angegeben worden. Die Theorie der Wechselstrommotoren, sowohl der asynchronen, wie der synchronen, ist in der jüngsten Zeit von verschiedenen Schriftstellern eingehend behandelt worden⁵⁾.

1) Arnold, Die Ankerwicklung der Gleichstrom-Dynamomaschine, Berlin 1891.

2) Journ. Inst. Electr. Engin., Bd. 18, S. 620. 1889.

3) Electrician, Bd. 26, S. 700. 1891.

4) Ebenda, auch Journ. Inst. Electr. Engin., Bd. 20, S. 303. 1891.

5) Ferraris, „Rotazioni elettrodinamiche“, Turin Acad., März 1888.

L. Duncan, „Alternate Current Motors“, Electr. World (N. Y.), Bd. 17, S. 341, 357.

Hutin und Leblanc, La Lumière Électrique, Bd. 40, S. 373.

J. Sahulka, Ueber Wechselstrom-Motoren, Leipzig 1892.

R. V. Picou, Les Moteurs Électriques à champ magnétique tournant, Paris 1892.

E. Arnold, Theorie und Berechnung der asynchronen Wechselstrom-Motoren; vergl. auch die Aufsätze desselben Verfassers in Electr. World (N. Y.), 1893/94.

G. Ferraris, „A Method for the Treatment of Rotating or Alternating Vectors, etc“, Electrician 1894, Bd. 33, S. 110, 129, 152, 184.

Reber, „Two- and Three-phase Motors“, Amer. Instit. Electr. Eng., Oct. 1894.

Steinmetz, Amer. Inst. Electr. Engineers, December 1894, S. 803.

A. Potier, „Sur les Moteurs à induit fermé sur lui-même“, Bull. de la Soc. Internationale des Electriciens, Mai 1894, S. 248.

De Bast, Bull. de l'Assoc. des Ingénieurs Electriciens, August 1893.

J. Hopkinson, „On the Theory of Alternating Currents, particularly in reference to Two Alternate-Current Machines connected to the same Circuit“, Journ. Soc. Electr. Engineers, Bd. 13, S. 496 1884.

W. M. Mordey, „On Parallel Working, with special reference to Long Lines“, Inst. of Electr. Engineers, Bd. 13, S. 260. 1894.

Blondel, „Couplage des Alternateurs“, La Lumière Electr., Bd. 45, S. 351. 1892.

Steinmetz, „Theory of a Synchronous Motor“, Amer. Inst. Electr. Engineers, 17. October 1894.

Picou, „Transmission de Force par Moteurs Alternatifs Synchrones“, Soc. Internationale des Électriciens, Februar 1895.

Bedell und Ryan, „Action of a Single-Phase Synchronous Motor“, Journ. Franklin Inst., März 1895.

Rhodes, „Theory of the Synchronous Motor“, Proc. Physical Society, 1895.

Kapitel III.

Physikalische Theorie der dynamoelektrischen Maschinen.

Alle dynamoelektrischen Maschinen beruhen auf dem von Faraday im Jahre 1831 entdeckten Vorgange, dass elektrische Ströme in Leitern entstehen, sobald letztere sich in einem magnetischen Felde bewegen. Dieser Grundsatz kann folgendermassen ausgedrückt werden:

Wenn ein Leiter in einem magnetischen Felde so bewegt wird, dass er die Kraftlinien schneidet, so wird im Leiter eine elektromotorische Kraft erregt, und zwar in einer Richtung, die rechtwinkelig zur Bewegungsrichtung und rechtwinkelig zur Richtung der Kraftlinien steht.

Fleming hat eine sehr zweckmässige Regel angegeben, um den Zusammenhang zwischen Bewegung, Magnetismus und inducirter elektromotorischer Kraft dem Gedächtnisse einzuprägen. Man halte den Daumen, den Zeige- und den Mittelfinger der rechten Hand so, dass die drei Finger, wie Fig. 9 andeutet, nahezu rechte Winkel miteinander bilden, um drei rechtwinkelige Achsen im Raume darzustellen. Wenn der Daumen die Richtung der Bewegung zeigt und der Zeigefinger die Richtung der Kraftlinien angiebt, so zeigt der Mittelfinger die Richtung der inducirten elektromotorischen Kraft¹⁾.

1) Eine gebräuchlichere Erinnerungsregel für die Richtung der inducirten Ströme ergibt sich aus der Uebertragung der bekannten Regel von Ampère: Man denke sich eine Figur im Leiter schwimmend und nach der positiven Richtung der Kraftlinien schauend. Wenn dann die Figur mit dem Leiter nach rechts zu bewegt wird, so schwimmt die erstere mit dem bei dieser Bewegung inducirten Strom. Oder: Man denke sich im magnetischen Felde befindlich, so dass die Kraftlinien in ihrer positiven Richtung bei den Füssen ein- und beim Kopfe austreten, und blicke in der Richtung, nach der der Leiter sich bewegt; die inducirte elektromotorische Kraft ist dann nach rechts gerichtet.

Die inducirte elektromotorische Kraft ist, wie Faraday gezeigt hat, proportional der Anzahl Kraftlinien, die in der Secunde geschnitten werden; also proportional der Feldstärke, der Länge und der Geschwindigkeit¹⁾ des bewegten Leiters. Nach Ohm's Gesetz ist für stetige Ströme die Stromstärke im Leiter gerade proportional

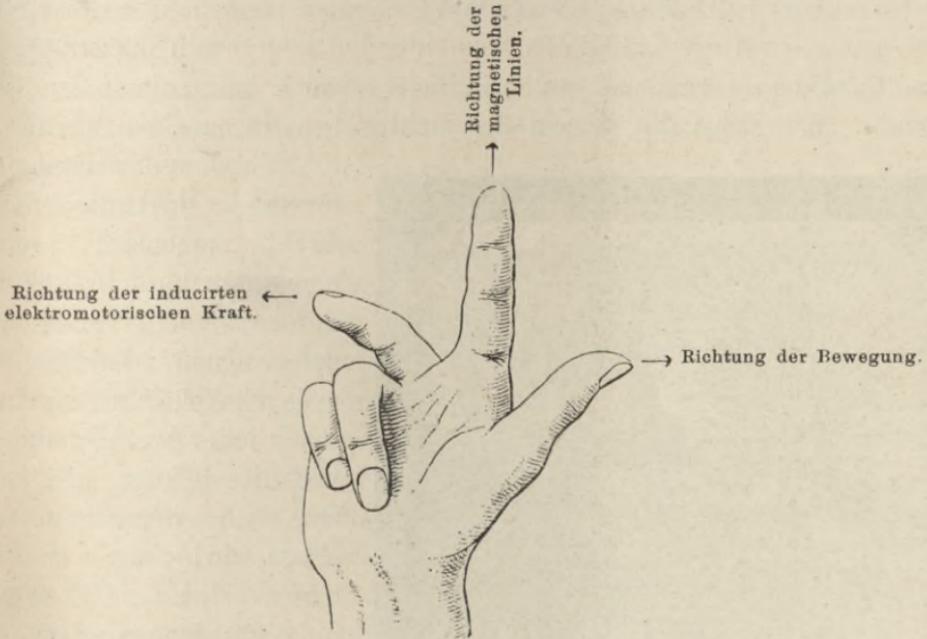
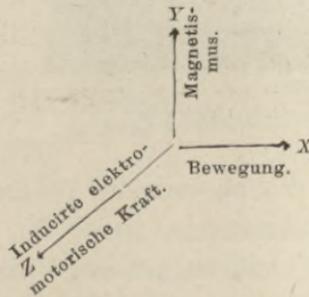


Fig. 9. Rechte Hand. Darstellung der Regel von Fleming.



der elektromotorischen Kraft und umgekehrt dem Widerstande des Leiters. Auf plötzlich erfolgende Stromstöße oder auf Ströme von schnell veränderlicher Stärke ist das Ohm'sche Gesetz nicht anwendbar.

Einer der wesentlichsten, aber zu häufig übersehenen Umstände bei dem Bau von Dynamomaschinen ist der, dass durchaus nicht allein der Widerstand einer Drahtspule oder eines Kreises die Ent-

1) Wenn die Bewegungsrichtung nicht rechtwinkelig zur Feldrichtung steht, so muss die Geschwindigkeitscomponente, welche zum Felde senkrecht steht, als wirkliche Geschwindigkeit angesehen werden.

stehung eines momentanen Stromes erschwert, sondern dass im Gegentheil die »Selbstinduction«, die von einem Theile der Spule oder des Kreises auf einen anderen Theil oder andere Theile desselben Kreises ausgeübt wird, in vielen Fällen ebenso bedeutend und in einigen Fällen noch bedeutender einwirkt, als der Widerstand.

Um genau den Faraday'schen Vorgang zu verstehen, wie durch Bewegung eines die Kraftlinien schneidenden Leiters ein elektrischer Strom im Leiter entstehen oder inducirt werden kann, ist es nothwendig, näher auf das Wesen des elektrischen Stromes einzugehen.

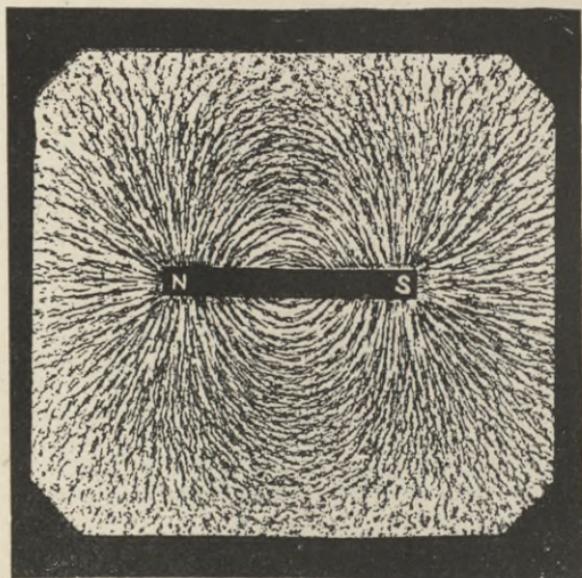


Fig. 10. Magnetisches Feld eines Stabmagnetes.

nicht in und entlang der Substanz des Drahtes, sondern wird durch das umgebende Mittel übertragen.

Solange wir nicht bestimmt wissen, was Elektrizität ist, so lange können wir auch keine genaue Kenntniss über die Natur des Stromes erlangen. Aber kein Elektriker hegt Zweifel über den sehr wichtigen Umstand, dass die magnetischen Kräfte, die dem Drahte beiwohnen, wenn er von einem Strome durchflossen wird, ganz und gar nicht im Drahte, sondern in dem umgebenden Raume herrschen.

Jeder weiss, dass der Raum oder das »Feld« um einen Magnet von magnetischen Kräften erfüllt ist, deren Richtung und Stärke nach Uebereinkommen durch die »Kraftlinien« dargestellt werden. Diese Linien gehen in Büscheln vom Nordpol aus und laufen zum Südpol (vergl. Fig. 10).

Ein vom elektrischen Strome durchflossener Draht erscheint von einem anderen Drahte durchaus nicht verschieden. Niemand hat jemals Elektrizität fließen sehen oder weiss genau, wie dies erfolgt. Es ist eine noch umstrittene Frage, wie die Elektrizität fließt, ob zwei in entgegengesetzter Richtung gleichzeitig fließende Ströme vorhanden sind, oder nicht. Eins aber ist gewiss: die Energie fließt überhaupt

Sie sind unsichtbar, bis man sie durch Ausstreuen von Eisenfeilspänen kenntlich macht; thatsächlich sind aber die Linien stets vorhanden und können auf mehrere verschiedene Arten wahrgenommen werden.

Die Ansicht des magnetischen Feldes an dem Polende eines Stabmagnetes (gegen die Endfläche gesehen) zeigt lediglich radiale Linien (Fig. 11).

Jeder sogen. elektrische Strom ist von einem magnetischen Felde umgeben, dessen Linien in ähnlicher Art dargestellt werden können. Zu diesem Zwecke bohrt man ein Loch in eine Karte oder eine Glasscheibe und steckt den Stromleiter hindurch. Werden dann Feilspäne auf die Karte oder Scheibe gestreut, so nehmen die Kraftlinien die Form konzentrischer Kreise an (Fig. 12). Die Linien laufen nicht in Büscheln aus, sondern vollständig rund um den Draht herum.

Jeder Stromleiter ist von einer Art magnetischen Wirbels, wie die Fig. 13 zeigt, umgeben.

Ein grosser Theil der Energie des sogen. elektrischen Stromes in einem Drahte besteht in diesen äusseren magnetischen Wirbeln. Die Entstehung derselben bedingt einen Energieverbrauch; der Strom erreicht nicht sogleich beim Entstehen seine volle Stärke; ein Theil seiner Energie wird während der ersten Zeit, in der der Strom noch anwächst, zur Erzeugung des umgebenden Feldes verbraucht. Bei einer Unterbrechung des Stromes kehrt diese Energie des umgebenden Feldes in den Stromkreis zurück, so dass das Feld, während es verschwindet, das Bestreben besitzt, den Strom zu erhalten; hierdurch wird der bekannte Unterbrechungsfunke erzeugt. Die magnetischen Wirbel wirken auf Magnete ein und suchen sie, wie es bei Galvanometernadeln der Fall ist, rechtwinkelig zum Stromleiter zu stellen.

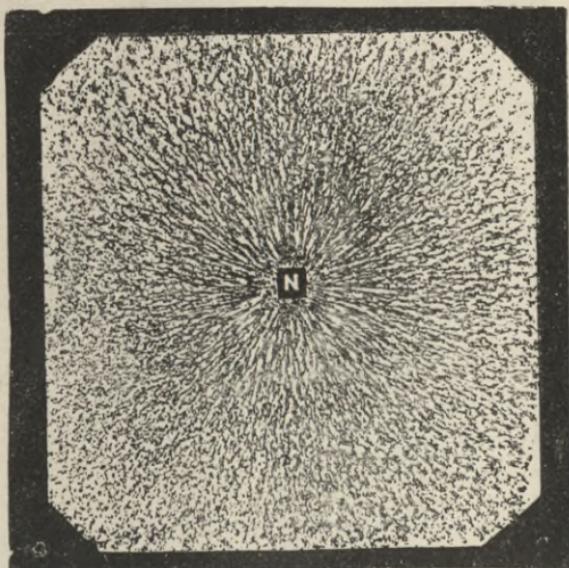


Fig 11. Magnetisches Feld um einen Pol.

Hiernach kann Faraday's Grundgesetz der Induction folgendermassen ausgedrückt werden: Wird ein Draht in der Nähe eines Magnetes durch das Kraftfeld bewegt, und schneidet der Draht die Kraftlinien, so werden rund um den sich bewegenden Draht magnetische Wirbel erregt oder mit anderen Worten: es entsteht ein sogen. elektrischer Strom in dem Drahte. Wird ein Magnetpol in eine Drahtschleife oder in einen Drahtkreis eingeführt, so entsteht in dem Drahte ebenfalls ein plötzlicher Strom, weil sich augenblicklich magnetische Wirbel bilden.

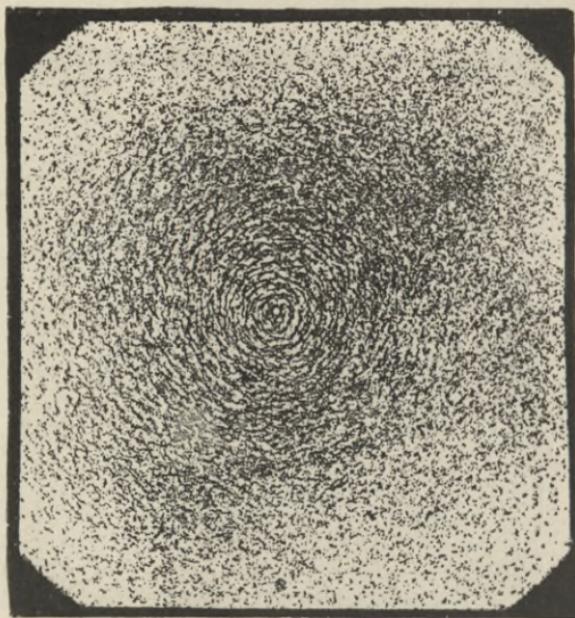


Fig. 12. Magnetisches Feld um einen Stromleiter
(Querschnitt).

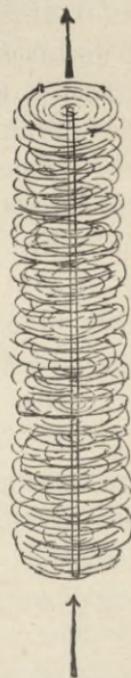


Fig. 13. Magnetischer Wirbel
um einen Stromleiter.

Nach der Ausdrucksweise von Faraday vermehrt diese Thätigkeit die Zahl der Kraftlinien, welche der Stromkreis fasst.

Die Bewegung des Leiters — entweder eines ganzen Kreises oder eines Theiles davon — muss aber so vor sich gehen, dass die Zahl der Kraftlinien, welche der ganze Kreis einschliesst, sich ändert. Ohne Aenderung der vom Kreise eingeschlossenen Kraftlinienzahl ist keine Induction möglich. Dagegen tritt immer und in jedem Kreise Induction auf, wenn sich irgendwie die Kraftlinienzahl ändert, auf welche Weise auch immer dies geschehen mag.

Wenn ein leitender Kreis — etwa ein Drahttring oder eine einfache Spule — einem gleichförmigen magnetischen Felde entlang

bewegt wird, wie dies Fig. 14 zeigt, so dass stets dieselben Kraftlinien durch den Kreis treten, so wird kein Strom erzeugt.

Wenn ferner, wie Fig. 15 zeigt, ein Ring so durch ein gleichförmiges Feld bewegt wird, dass während der Lagenänderung einerseits ebenso viele Kraftlinien austreten, als andererseits eintreten, so wird gleichfalls kein Strom erzeugt; die Zahl der eingeschlossenen Kraftlinien hat sich nicht geändert.

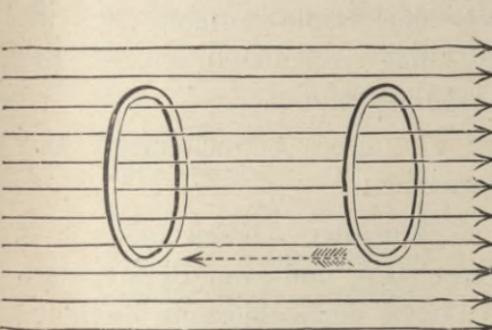


Fig. 14. Bewegter Kreis, der im gleichförmigen Felde keine Kraftlinien schneidet.

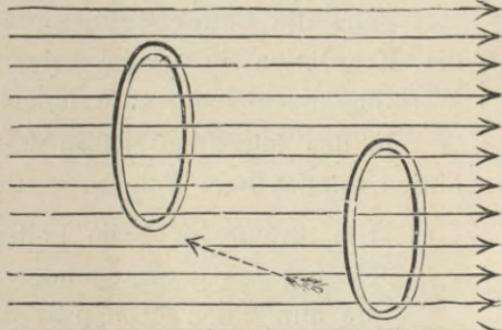


Fig. 15. Kreis, bei dessen Bewegung die Zahl der geschnittenen Kraftlinien sich nicht ändert.

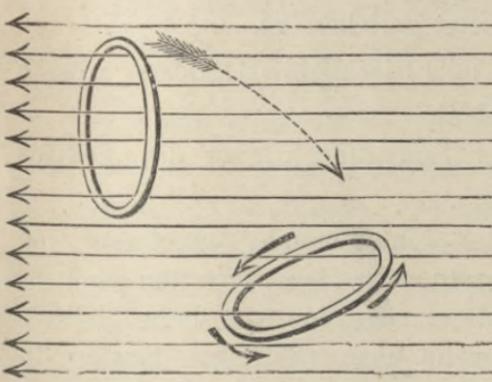


Fig. 16. Kreis, bei dessen Bewegung sich die Zahl der geschnittenen Kraftlinien ändert.

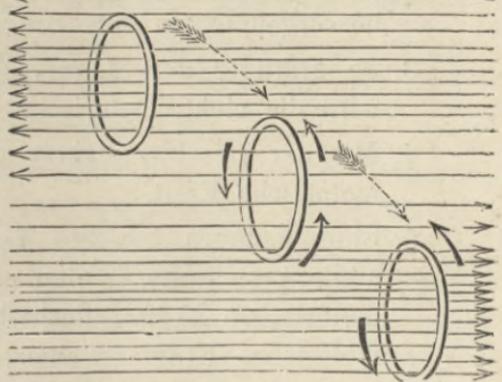


Fig. 17. Bewegung eines Kreises in einem ungleichmässigen Felde.

Dreht sich der Ring lediglich um eine Mittelpunktachse, wie der Kranz eines Rades, so wird stets dieselbe Zahl von Kraftlinien geschnitten, durch die Bewegung entsteht kein Strom. Wenn aber, wie in Fig. 16, der Ring während seiner Bewegung durch das gleichförmige magnetische Feld sich neigt oder um eine in seiner Ebene liegende Achse sich dreht, so wird die Zahl der hindurch tretenden Kraftlinien geändert, und es entstehen Ströme.

Die Ströme fließen im positiven Sinne (nach der Gegend zu gesehen, nach der die Kraftlinien gerichtet sind), wenn die Bewegung

eine Verminderung der Zahl der durchtretenden Kraftlinien bewirkt; sie fliessen in entgegengesetzter Richtung, wenn eine Vermehrung der geschnittenen Kraftlinien eintritt.

Ist das Kraftfeld kein gleichförmiges, so werden durch einfache Bewegung des Ringes von einem Orte mit grösserer Dichtigkeit der Linien zu einem Orte mit geringerer Dichtigkeit — wie in der Fig. 17 angegeben — oder umgekehrt Ströme erzeugt.

Falls die Bewegung dann nach einer Stelle gerichtet ist, wo die Kraftlinien in umgekehrter Richtung verlaufen¹⁾, so ist die Wirkung die gleiche, wird jedoch kräftiger sein.

In den folgenden Sätzen fassen wir unsere Betrachtungen und einige unmittelbare Folgerungen zusammen:

1. Um Ströme in einem Leiter zu induciren, müssen Leiter und Magnet sich gegeneinander verschieben, und zwar derart, dass die durch den Stromkreis des Leiters eingeschlossene Zahl der Kraftlinien sich ändert.
2. Durch Anwachsen der Zahl eingeschlossener Kraftlinien wird eine elektromotorische Kraft erzeugt, die der durch Abnahme hervorgebrachten entgegengesetzt gerichtet ist.
3. Je kräftiger der Magnetpol oder das Feld ist, desto grösser wird die elektromotorische Kraft.
4. Mit der Geschwindigkeit der Bewegung wächst die elektromotorische Kraft.
5. Sind mehrere bewegte Leiter hintereinander geschaltet, so addiren sich die in den einzelnen Theilen erzeugten elektromotorischen Kräfte; deshalb lässt sich eine sehr hohe elektromotorische Kraft erhalten, wenn man zahlreiche Spulen in geeigneter Verbindung anwendet.
6. Da die Quantität oder Stärke des Stromes ebensowohl von dem Widerstand der den Kreis bildenden Leiter abhängt, als von der elektromotorischen Kraft, so ist jeglicher nutzlose Widerstand zu vermeiden.
7. Da die Zahl der von dem beweglichen Leiter umschlossenen magnetischen Kraftlinien begrenzt ist und während der Strom-

1) In Wirklichkeit ist es unmöglich, ein Feld genau wie die Fig. 17 zeigt, zu erhalten, weil in dem mittleren Theile des Feldes die magnetischen Linien eine gekrümmte Form annehmen würden.

erzeugung zu- und abnimmt, muss der bewegte Leiter nothwendig Ströme von wechselnder Richtung hervorbringen.

8. Durch Anwendung eines passenden Stromwenders kann man alle Ströme, die während der Entfernung und Annäherung hervorgebracht werden, in dem Zuführungsleiter zum äusseren Stromkreise in gleiche Richtung bringen. Wenn dann die umlaufenden Spulen so angeordnet sind, dass ein Spulensatz in Thätigkeit gelangt, ehe die elektromotorische Kraft im vorhergehenden Satz verschwunden ist, wird es durch Verwendung des geeigneten Stromwenders möglich, die verschiedenen getrennten Ströme in einen praktisch gleichförmigen Strom zu vereinigen.
9. Da die Induction von der gegenseitigen Bewegung des Leiters und der Kraftlinien abhängt, so ist es nur eine Frage der mechanischen Anordnung, ob der Magnet feststehen und der kupferne Leiter sich bewegen soll, oder ob umgekehrt der Magnet bewegt wird und der Leiter ruht.
10. Für den bewegten Leiter, der die elektromotorische Kraft erzeugt, indem er die Kraftlinien schneidet, kommt es nicht in Betracht, ob die Kraftlinien einem Dauermagnet aus Stahl oder einem Elektromagnet entstammen, wenn nur die Zahl der geschnittenen Kraftlinien die gleiche ist.
11. Für den bewegten Leiter kommt der Ursprung der Bewegung nicht in Betracht. Ob die Bewegung durch eine Dampfmaschine oder eine Gaskraftmaschine, oder durch eine mit der Hand getriebene Maschine, oder durch die Triebkraft eines elektrischen Stromes, der im Draht selbst fliesst (wie bei elektrischen Motoren) hervorgebracht wird, ist gleichgültig; vorausgesetzt, dass die Geschwindigkeit sowie die Zahl der geschnittenen Kraftlinien gegeben sind, wird auch gleiche elektromotorische Kraft erzielt werden.

Zur besseren Klarlegung der Betrachtungen, die bei Besprechung der einzelnen Maschinenformen anzustellen sind, ist es zweckmässig, zunächst einige grundsätzliche Punkte für die Wirkungsweise und den Bau der Dynamomaschinen im Allgemeinen zu besprechen. Zuerst werden die verschiedenen wesentlichen Theile einer Maschine zu behandeln sein. Danach sind die Vorgänge in einer im Betriebe befindlichen Maschine zu betrachten, die Wirkung des magnetischen Feldes auf den umlaufenden Anker, sowie die Rückwirkung des umlaufenden

Ankers auf das Feld. Ferner wird das magnetische Gebiet behandelt und die magnetischen Eigenschaften des Eisens besprochen werden, soweit als dies zum Zwecke des Entwurfes einer Maschine nothwendig ist. Endlich werden Bau und Anordnung von Feldmagneten und von Ankern erörtert werden.

Bestandtheile der dynamoelektrischen Maschinen.

Die denkbar einfachste Dynamomaschine ist in Fig. 18 dargestellt.

Eine einzelne rechteckige Drahtschleife dreht sich im einfachen und gleichförmigen magnetischen Felde zwischen den Polen eines starken Magnetes. Steht die Ebene der Drahtschleife senkrecht, so ist die Zahl der von rechts nach links hindurchtretenden Kraftlinien ein Maximum; wird die Schleife in die wagerechte Lage gedreht, so sinkt die Zahl der durchtretenden Kraftlinien bis auf Null; bei weiterer Fortsetzung der Drehung beginnen die Kraftlinien auf der anderen Seite der Schleife einzutreten, so dass bei einer Drehung um 180 Grad ein negatives Maximum erreicht wird.

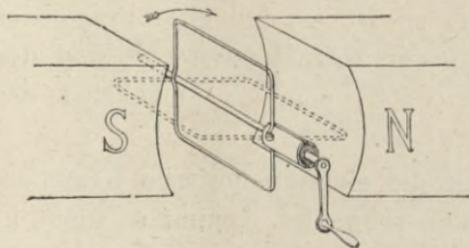


Fig. 18. Ideale einfache Dynamomaschine.

Während der halben Umdrehung werden Ströme in der Schleife inducirt, die in der Richtung von rückwärts nach vorwärts in dem links sich hebenden Schleifentheile und in entgegengesetzter Richtung — nach rückwärts — in dem rechts sich senkenden Schleifentheile verlaufen.

Sobald die Drehung 180 Grad überschreitet, findet die Induction im umgekehrten Sinne statt; denn die Zahl der negativ gedachten Linien nimmt nun ab, was mit einem Wachstume der Linienzahl in positiver Richtung gleichbedeutend ist. Dieses Wachstum setzt sich fort, bis die Schleife ihre ursprüngliche Lage wieder erreicht, also eine volle Umdrehung gemacht hat. Wäre jedes Schleifenende mit einem besonderen Metallringe auf der Achse verbunden und läge gegen jeden Ring eine Feder an, so würden durch einen mit dieser Feder verbundenen Drahtkreis Wechselströme fließen. Wenn indessen der Apparat zur Lieferung von Gleichströmen geeignet sein soll, so muss ein besonderes Hilfsmittel hinzugefügt werden. Um den Strömen abwechselnder Richtung im äusseren Stromkreise gleiche Richtung zu geben, muss ein zweitheiliger Stromwender angewendet werden.

Dieser Stromwender besteht aus einer der Länge nach in zwei Theile zerschnittenen Metallröhre und ist auf einem Cylinder von Hartholz oder anderem isolirenden Materiale befestigt; jede Hälfte wird mit einem Ende der Drahtschleife verbunden, wie aus Fig. 18 ersichtlich wird.

Gegen den Stromwender drückt ein Paar metallischer Federn oder »Bürsten« (Fig. 19), die die Ströme zum äusseren Stromkreise führen. Wenn die Bürsten so gestellt werden, dass der eine Theil der gespaltenen Röhre von der Berührungsstelle mit der Bürste fort- und der andere Theil zu derselben hingeleitet, so werden offenbar in dem Augenblicke, in dem die Schleife die Stelle im Felde durchläuft, wo die Induction sich umkehrt, die in der Schleife inducirten Wechselströme »gewendet« und in gleicher Richtung in den äusseren Stromkreis geleitet. Man sollte deshalb eine solche Stellung der Bürsten als richtig annehmen, dass die Wendung genau

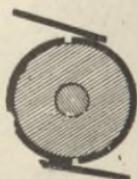


Fig. 19. Zweitheiliger Stromwender.

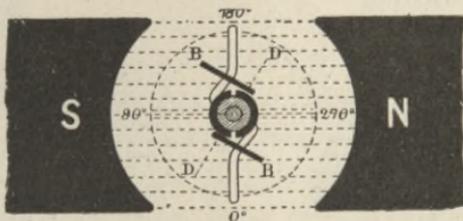


Fig. 20. Einfache Schleife im einfachen Felde.

zu dem Zeitpunkte erfolgte, in dem die Schleife sich durch die senkrechte Lage bewegt.

In der Praxis findet man dagegen, dass eine geringe Verschiebung der Bürsten nach vorwärts nothwendig ist. Fig. 20 zeigt die Bürsten *BB* so angeordnet, dass sie den Stromwender nicht genau an dem höchsten und tiefsten Punkte berühren, sondern in zwei nach der Linie *DD* verschobenen Punkten. Die Linie *DD* führt die Bezeichnung »Durchmesser der Stromwendung«. Wenn wir an Stelle der gedachten einzelnen Schleife eine Wicklung nehmen, die aus vielen Drahtwindungen besteht, wie sie von Sturgeon im Jahre 1835 vorgeschlagen wurde und in der Fig. 21 dargestellt ist, so wird an der Sachlage nichts geändert, nur die gesammte inducirte elektromotorische Kraft wird verhältnissmässig grösser, weil in allen Windungen gleichzeitig eine Inductionswirkung auftritt. Wird der beschriebenen Wicklung ein eiserner Kern hinzugefügt, so erhält man die im Jahre 1856 von Siemens dem Anker gegebene Gestalt, die sich im Durchschnitte in Fig. 22 zeigt.

Eine kleine magnetoelektrische Maschine alter Form mit einem solchen Anker stellt die Fig. 23 dar.

Obleich diese Form schon viele Jahre, ausser für kleine Triebmaschinen und dergl., verlassen ist, so gab die Maschine doch eine grosse Anregung für den Bau neuerer Maschinen; für jede grössere Leistung ist sie jedoch vollständig durch die nachstehend beschriebenen Ring- und Trommelanker bei Seite geschoben worden.

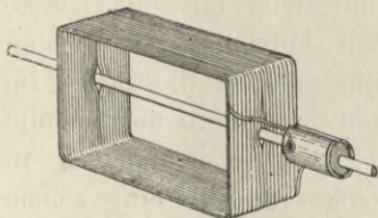


Fig. 21. Einfache rechteckige Wickelung.

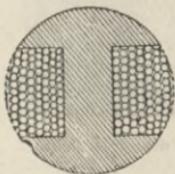


Fig. 22. Querschnitt des I-Ankers von Siemens.

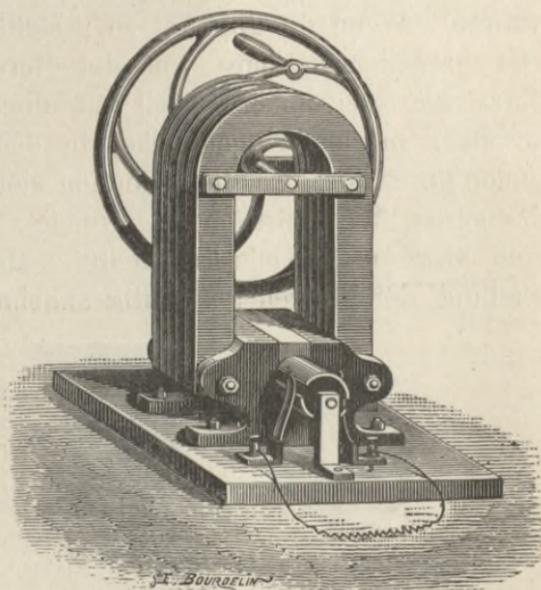


Fig. 23. Alte Maschine von Siemens mit I-Anker und Dauermagnet.

In ihrer einfachsten Form besteht die Dynamomaschine aus zwei Haupttheilen:

1. einem Anker, der mit einem Kupferleiter umwickelt ist, in dem beim Umlauf des Ankers elektromotorische Kraft inducirt wird;
2. einem Feldmagnet, d. h. einem Magnet, dessen Bestimmung es ist, magnetische Kraftlinien hervorzubringen, die von den Ankerleitern bei ihrem Umlauf geschnitten werden.

Bei allen Maschinen, mögen sie zur Erzeugung von Gleichstrom oder von Wechselstrom bestimmt sein, lassen sich diese beiden Theile erkennen.

Beinahe in allen Gleichstrommaschinen ist der Feldmagnet unbeweglich und besteht aus einem verhältnissmässig einfachen und massiven Elektromagnete; der Anker bildet den drehbaren Theil, seine Bauart ist verwickelter. In Wechselstrommaschinen ist der Feldmagnet gewöhnlich vielpolig; die Mehrzahl dieser Maschinen

besitzt einen feststehenden Magnet, während der Anker umläuft; es gibt jedoch viele neuere Wechselstrommaschinen, in denen der Anker feststeht und der Feldmagnet umläuft. Die Bezeichnung »Feldmagnet« und »Anker« gibt an sich kein Kennzeichen, ob es sich um Drehung handelt oder nicht. Der Name »Feldmagnet« kommt jenem Theile zu, der seinen Magnetismus während des Umlaufes ständig beibehält, wobei es gleichgültig ist, ob dieser Theil feststeht oder umläuft; der Name »Anker« kommt demjenigen Theile zu, der beim Betriebe der Maschine seinen Magnetismus in regelmässig wiederholter Weise wechselt, sei es, dass dieser Theil feststeht oder umläuft. Im Stromerzeuger ist der Anker derjenige Theil, der mit den Leitungen des äusseren Stromkreises verbunden wird und ihnen Strom liefert. Im Motor ist es der Theil, der den Strom von den Leitungen empfängt.

Bei Gleichstrommaschinen kommt noch ein anderer Theil von grosser Bedeutung in Betracht: nämlich ein zur Aufnahme oder zum Sammeln der vom umlaufenden Anker abgegebenen Ströme bestimmter Apparat. Dieser besteht aus zwei wesentlichen Theilen: dem Stromwender (oder Stromsammeler, Stromabgeber), der am Anker sitzt und mit ihm umläuft, und den Bürsten. Die Bürsten bilden leitende Contactstücke, die sich gegen die Oberfläche des umlaufenden Stromabgebers legen, und sind mit besonderen Bürstenhaltern versehen, die an einer stellbaren Vorrichtung, dem Bürstenhebel, angebracht werden.

Bei Wechselstrommaschinen ist kein Stromwender erforderlich; im Allgemeinen sind solche Maschinen nur mit einer Vorrichtung versehen, die eine gleitende Verbindung vermittelt. Bei den Formen der Wechselstrommaschinen, die umlaufende Anker besitzen, müssen sich die Spulen in beständiger metallischer Verbindung mit den Zuleitungen des Hauptkreises befinden; bei den Formen mit feststehendem Anker, an dem eine solche Anordnung nicht erforderlich ist, müssen gleitende Contacte vorhanden sein, damit die Wicklungen des umlaufenden Feldmagnetes in beständiger metallischer Verbindung mit dem zur Erregung bestimmten Hilfskreise stehen. In jedem Falle besteht die zweckentsprechende Anordnung aus einem Paar Schleifringen; gegen jeden Ring liegt eine Bürste an.

Zu den aufgezählten elektrischen und magnetischen Theilen kommen noch rein mechanische. Der umlaufende Theil muss auf einer geeigneten Achse befestigt werden, deren Herstellung eine

rein mechanische Sache ist. Um die Kraft von der Achse auf die umlaufenden Ankerleiter zu übertragen, muss der umgetriebene Theil sicher mit der Achse verbunden werden. Die Achse selbst muss in passenden Lagern laufen, die mit Schmiergefässen zu versehen sind, um das Heisslaufen der Achse vermeiden zu können. Zur Uebertragung der Kraft von der treibenden Maschine ist ein Vorgelege oder ein Getriebe anzubringen, wenn nicht die Dynamomaschine mit der treibenden Maschine unmittelbar gekuppelt wird. Endlich muss die ganze Dynamomaschine auf einer geeigneten Bodenplatte aufgebaut werden; zuweilen ist die Bodenplatte auf Schienen verschiebbar, so dass man die Maschine mittels Schrauben verschieben kann, wenn der Treibriemen schlaff geworden ist.

Die folgenden Erörterungen betreffen Dynamomaschinen für Gleichstrom, deren verschiedene Theile behandelt werden. Die Maschinen für Wechselstrom werden in einem späteren Kapitel besprochen.

Gleichstrommaschinen.

Anker.

Auf die einfache Schleife zurückkommend, wollen wir eine solche in ihrer Beziehung zu dem zweitheiligen Stromwender etwas näher betrachten; vergl. Fig. 24. Dieselbe gespaltene Röhre oder derselbe zweitheilige Stromwender wird auch für eine Schleife von zwei oder mehr Windungen genügen, wie Fig. 25 zeigt.

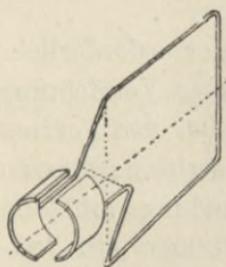


Fig. 24. Einfache Schleife als Anker.

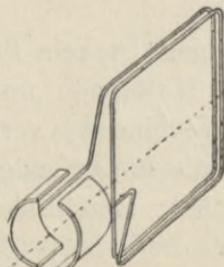


Fig. 25. Ankerschleife mit zwei Windungen.

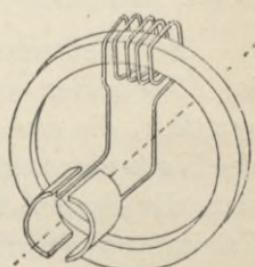


Fig. 26. Einfacher Ringanker mit einer Wickelung.

Wir dürfen aber auch anstatt einer Schleife eine kleine Wickelung nehmen, die in mehreren Windungen auf einen Ring gewunden ist. Diese Spule (Fig. 26) kann als eine Abtheilung eines Pacinotti'schen oder Gramme'schen Ringes betrachtet werden; durch sie gehen ebenso Kraftlinien wie durch die Schleife. In der dargestellten Lage befindet sie sich auf dem höchsten Punkte ihres Ganges, und die Zahl der hindurchtretenden Kraftlinien ist ein Maximum. Bei der Drehung

nimmt die Zahl der hindurchtretenden Kraftlinien ab und wird Null, sobald eine Verschiebung um 90 Grad aus der ursprünglichen Lage eingetreten ist. Es ist aus dem Gesagten leicht zu erkennen, dass eine zweite an der gegenüberliegenden Seite des Ringes angebrachte Spule eine gleiche inductive Thätigkeit in demselben Augenblicke entfalten muss und daher auch mit dem Stromwender verbunden werden darf. Werden die zwei Spulen nebeneinander geschaltet, wie Fig. 27 zeigt, so bleibt die elektromotorische Kraft dieselbe, wie bei jeder einzelnen Spule, aber der Widerstand der beiden verbundenen Spulen beträgt nur die Hälfte des Widerstandes einer einzelnen Spule.

Es ist klar, dass man zwei parallele Schleifen in ähnlicher Weise mit einem zweitheiligen Stromwender verbinden kann. Hätte jede Schleife eine Windung, so stellt Fig. 28 die Anordnung dar; indessen ist die Methode der Verbindung ebenso für Schleifen mit vielen Windungen anwendbar.

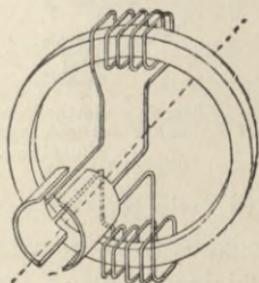


Fig. 27. Einfacher Ringanker mit zwei parallelen Wicklungen.

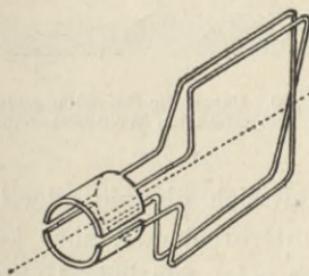


Fig. 28. Einfache Ankerschleife mit zwei parallelen Wicklungen.

Alle derartigen Anordnungen, die die Benutzung eines zweitheiligen Stromwenders in sich schliessen, einerlei, ob es sich nur um einen Kreis oder um zwei parallele Kreise in den herangeführten Spulen handelt, haben den Nachtheil, dass die Ströme nicht vollkommen ununterbrochen (continuirlich) sind, wenn sie auch durch den Stromwender gleiche Richtung erhalten.

In einer einzelnen Spule würden ohne Stromwender während aufeinander folgender Umdrehungen Ströme erzeugt werden, die in ihrem Verlaufe durch eine sinusoidale Curve (Fig. 29) graphisch dargestellt werden können. Werden durch Anbringung eines Stromwenders die abwechselnden Hälften dieser Ströme umgekehrt, so dass ihre Richtung im äusseren Stromkreise dieselbe bleibt, so sind die Ströme gleichgerichtet, aber nicht im strengen Sinne ununterbrochen, sondern von der Gestalt in Fig. 30, die zwei während jeder Umdrehung der Spule erzeugte Ströme darstellt.

Um den Strömen ununterbrochenen Zusammenhang zu geben, müssen wir vom einfachen zweitheiligen Stromwender zu einem solchen mit grösserer Zahl der Theile übergehen und demzufolge eine grössere Spulenzahl anbringen. Die Spulen sind so anzuordnen, dass ein Satz in Thätigkeit gelangt, wenn die Thätigkeit des anderen aufhört. Befestigen wir auf unserem eisernen Ringe zwei Sätze Spulen, deren Ebenen in rechten Winkeln sich schneiden, wie in Fig. 31, so dass ein Satz in die Lage der höchsten Wirksamkeit gelangt, während der andere am geringsten beeinflusst wird (einer steht parallel, der andere senkrecht zu den Kraftlinien) und ihre

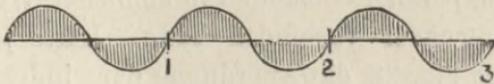


Fig. 29. Sinuscurve zur Darstellung eines Wechselstromes.



Fig. 30. Curve zur Darstellung eines gleichgerichteten Wechselstromes.

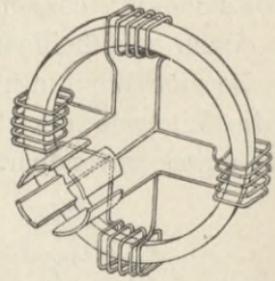


Fig. 31. Vierteiliger Ringanker mit geschlossener Wicklung.

Thätigkeit sich übereinander lagert, so wird, wie Fig. 32 zeigt, wohl ein ununterbrochener, aber kein gleichmässiger Strom hervorgebracht, denn er zeigt für jede Umdrehung vier kleine Wellen. Wird eine grössere Zahl getrennter Wicklungen angewendet und lagern sich deren Wirkungen, in regelmässigen Zwischenräumen zu-

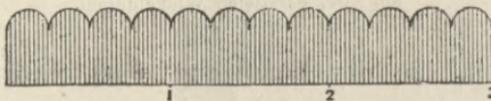


Fig. 32. Curve eines nicht stetigen Gleichstromes.

sammentreffend, übereinander, so entsteht eine ähnliche Curve, aber mit entsprechend zahlreicheren und weniger erhabenen Kuppen. Ist die Zahl der Spulen sehr gross und sind die gegenseitigen Ueberdeckungen der Curven vollständiger, so stellt sich die Reihe der Kuppen praktisch als eine gerade Linie dar, d. h. der Strom ist für die Praxis dann gleichbleibend stark zu nennen.

Wie die Fig. 31 darstellt, sind sämtliche vier Wicklungen zu einem geschlossenen Kreise vereinigt; das Ende der ersten ist mit dem Anfange der zweiten verbunden und so der Reihe nach weiter; die letzte Abtheilung schliesst sich an die erste an. Um die Wirkung der Wicklungen vollkommen gleichförmig zu gestalten, muss man eine sehr grosse Zahl Abtheilungen anwenden (vergl. die Berechnungen

im Kapitel IX), die in regelmässiger Folge und in regelmässigen Zwischenräumen eine nach der anderen die Lage der stärksten Induction erreichen.

Fig. 33 stellt einen mit zwei Spulenpaaren in rechten Winkeln zu einander bewickelten Trommelanker mit einem viertheiligen Stromabgeber dar. Aus den Fig. 31 und 33 ergibt sich, dass jede Spulenabtheilung mit der nächsten der Reihe nach verbunden ist; sämtliche Windungen bilden daher einen einzigen geschlossenen Kreis. Ebenso ist das Ende jeder Abtheilung und der Anfang der folgenden mit einem Streifen des Stromabgebers verbunden. In der Praxis werden die Theile (Streifen oder Stäbe) des Stromabgebers nicht aus Längsstücken eines Metallrohres hergestellt, sondern sie bestehen aus einer Anzahl paralleler Stäbe von Kupfer,

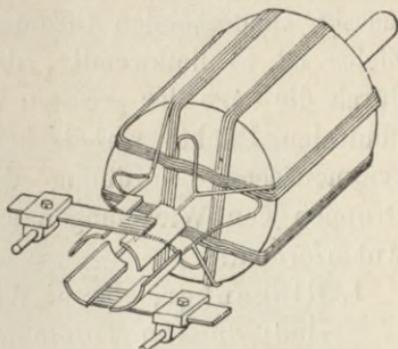


Fig. 33. Viertheiliger Trommelanker mit geschlossener Wickelung.

Stückgut oder Phosphorbronze, die an dem Umfange eines isolirenden Cylinders befestigt sind, wie aus der Fig. 36 zu ersehen ist. Es ist noch zu bemerken, dass in dem ununterbrochenen Kreise um den Anker der Strom zwei Wege in der Wickelung von einer Bürste zur anderen findet, wie in allen Ring- und Trommelankern; die Fig. 31 und 33 zeigen dies in vereinfachter Art.

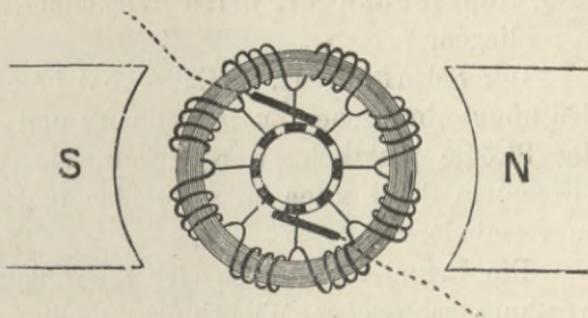


Fig. 34. Einfacher Ringanker zur Darstellung der Verbindungen der Wickelung.

Die für viertheilige Anker passenden Schlussfolgerungen gelten auch für einen Anker mit noch grösserer Zahl der Wickelungen, wie ein solcher in Fig. 34 dargestellt ist.

In den folgenden Kapiteln wird hierüber Weiteres enthalten sein. Hier mag noch erwähnt werden, dass in allen geschlossenen Ankerwickelungen, seien diese Ring- oder Trommelwickelungen, der Stromabgeber oder Stromwender ebenso viele Theile erhalten muss, als die Wickelung Abtheilungen enthält.

Der besondere Fall bei Ankern mit offenen Wickelungen wird im Kapitel XVII erläutert. In derartigen Maschinen werden

die Spulen nicht reihenweise hintereinander verbunden; an Stelle des gebräuchlichen Stromabgebers mit einer grossen Zahl paralleler Stäbe tritt ein Stromabgeber besonderer Bauart.

Die bis jetzt betrachteten Formen waren die »Trommel«- und »Ring«-Anker; diese sind indessen nicht die allein möglichen. Das Ziel aller derartigen Wickelungsschaltungen ist, wie schon auseinandergesetzt: einen für praktische Zwecke als ununterbrochen und gleichmässig anzusehenden Strom zu erhalten. Zur Erreichung dieses Zieles ist es nothwendig, dass einige der Einzelwickelungen sich durch die Lage der grössten Wirkung bewegen, während andere am neutralen Punkte vorbeigehen und zeitweise unthätig sind. Eine symmetrische Anordnung der einzelnen Wickelungen oder der Gruppen von Wickelungen um die Achse findet man bei folgenden Ankerformen:

1. Ringanker, deren Wickelungen auf einem Ringe gruppirt sind; die Haupt-Symmetrieachse ist auch die Drehungsachse.
2. Trommelanker, deren Wickelungen der Länge nach über der Oberfläche einer Trommel oder eines Cylinders liegen.
3. Polanker mit Wickelungen auf besonderen Polen, die am Umfange einer Scheibe oder einer Nabe speichen- oder strahlenförmig hervorragen.
4. Scheibenanker, deren Wickelungen flach auf einer Scheibe liegen.

Der Scharfsinn der Erfinder hat besonders drei Ziele verfolgt: den ununterbrochenen Zusammenhang und die gleichbleibende Stärke der Ströme praktisch zu erreichen, die Wirbelströme (Foucault-Ströme) in den Kernen zu vermeiden und den nutzlosen Widerstand zu vermindern.

Die Erfinder begnügen sich meist damit, den Strom durch Anwendung zahlreicher Wickelungsabtheilungen möglichst zusammenhängend zu gestalten. In Pacinotti's alter Maschine waren die Wickelungen zwischen vorstehende Zähne eines eisernen Ringes gelegt. Gramme zog vor, die Wickelungen um die ganze Oberfläche eines ringförmigen eisernen Kernes zu legen; um die schädlichen Wirbelströme zu vermeiden, wendete er an Stelle der massiven Kerne ein Bündel gefirnissten, in vielen Windungen liegenden Eisendrahtes an.

Für Ringanker werden gegenwärtig dünne Kernscheiben aus Eisenblech allgemein bevorzugt. Bei scheibenförmigen Ringankern werden die Kerne aus Bändern aufgebaut. Diejenigen Theile der Kupferwickelungen, die innen durch den Ring laufen, schneiden

keine Kraftlinien, falls nicht Polstücke des Feldmagnetes nach innen vorragen. Bei den gewöhnlichen Formen der Dynamomaschine mit äusseren Magneten wirken die inneren Theile der Ringwicklung daher lediglich als Leiter und nicht als Inductoren; sie stellen einen bestimmten Betrag schädlichen Widerstandes dar. In gut gebauten Maschinen ist dieser Widerstand indessen ohne Bedeutung gegenüber dem Widerstande des äusseren Kreises, der Nachtheil des schädlichen Widerstandes beruht zum grössten Theile auf Einbildung.

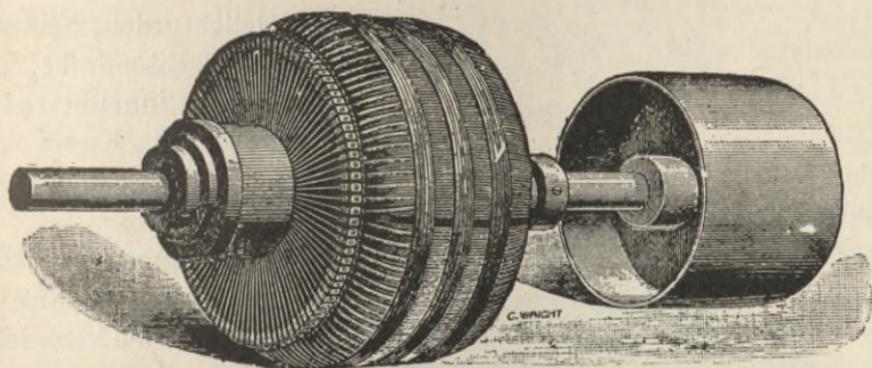


Fig. 35. Ringanker einer Maschine von Gramme.

Die Erfinder haben die Kupfermasse verringern wollen, indem sie entweder vorstehende Flansche den Polstücken anpassen, oder

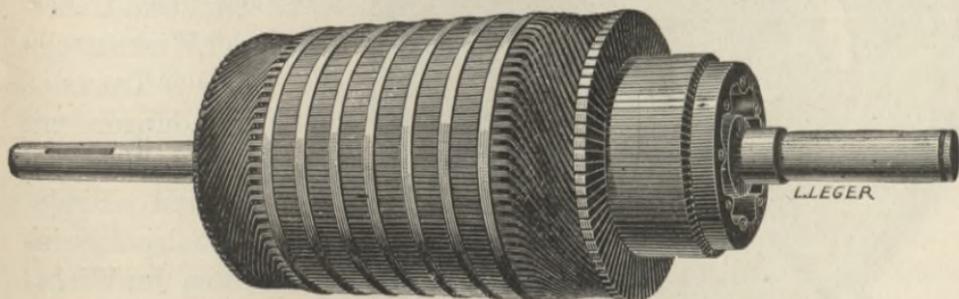


Fig. 36. Trommelanker der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft.

innenliegende Magnete benutzten, oder noch in anderer Weise, indem sie den Ring scheibenförmig abflachten, um die inneren Theile der Ringspulen ganz unwesentlich zu machen. In der That stellen die Flachringanker Formen dar, welche ganz verschieden sind von denjenigen Anker, in denen der Ring in die cylindrische Gestalt übergeht. Bei einigen grossen deutschen Maschinen neuerer Art befindet sich der Ring ausserhalb der Feldmagnete, so dass der äussere Theil der Wicklung nicht inducirt wird und unthätig bleibt; die Ströme werden unmittelbar von dem Ringe durch Bürsten entnommen, die

auf dem Umfange schleifen. Die verschiedenen Arten der Wickelung und Verbindung der Leiter auf dem Anker werden im Kapitel XII eingehend erörtert werden. Ein vollständiger Ringanker mit dem Stromabgeber und Riemenscheibe ist in der

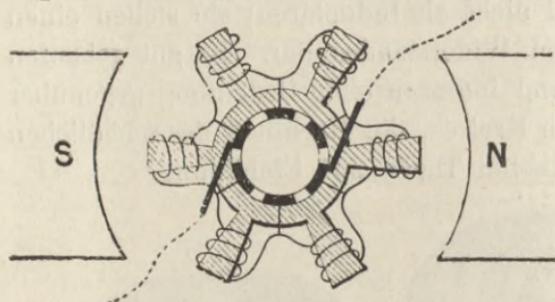


Fig. 37. Einfacher Polanker.

Fig. 35 dargestellt. Trommelanker, wie solche zuerst von Siemens hergestellt wurden, besaßen Kerne aus Eisendraht, der auf einen inneren nicht magnetischen Kern gewickelt wurde. Weston wendete dafür gestanzte Eisenscheiben mit Zähnen an; Edison benutzte Scheiben ohne Zähne.

Auch besondere Arten der Herstellung der Windungen und Ver-

bindungen der Kupferleiter wurden von vielen Erfindern ersonnen.

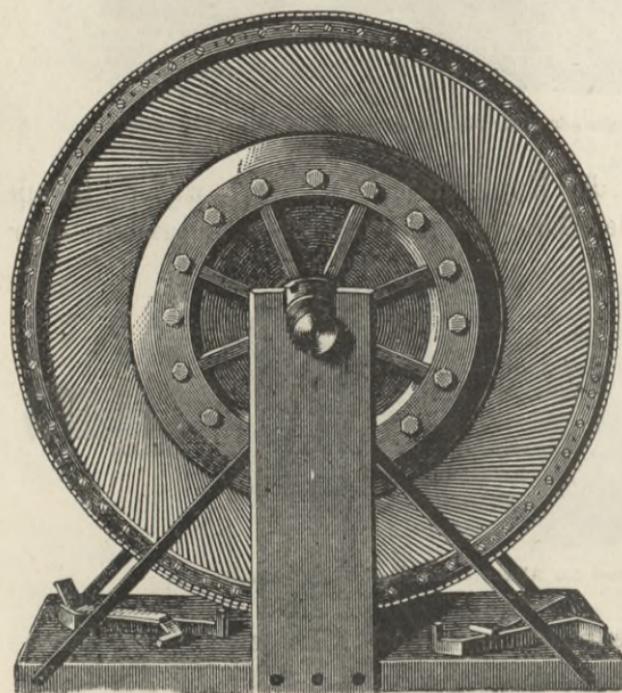


Fig. 38. Scheibenanker der Maschine von Fritsche.

bindungen der Kupferleiter wurden von vielen Erfindern ersonnen. Ein vollständiger Trommelanker ist in der Fig. 36 abgebildet. Sie zeigt das Uebergreifen der Wicklungen am Ende der Trommel, die Verbindungen mit dem Stromabgeber und die äusseren Bindedrähte, die das Auseinanderfliegen der Wicklung verhindern. Polanker, deren Wicklungen auf radienartig vorstehende Pole gelegt sind, wurden von Allan, Lontin und Weston hergestellt. Das Prinzip der Lontin'schen Maschinen, in denen die Spulen wie die Abtheilungen eines Pacinotti'schen oder Gramme'schen Ringes verbunden werden, zeigt die Fig. 37. Der Durchmesser der Stromwendung ist hier parallel zum polaren Durchmesser, weil die Zahl der Kraftlinien in denjenigen Spulen ein Maximum wird, die links und rechts liegen.

Dies ist keine geeignete Bauart für Gleichstromanker, denn sie erlaubt nicht, die Wickelung in eine genügend grosse Zahl Unterabtheilungen zu zerlegen, und deshalb ist die Selbstinduction in jeder Unterabtheilung zu gross.

Die Scheibenanker zerfallen in zwei Arten:

1. solche, deren Wickelungen als eine Anzahl kleiner nebeneinanderliegender Spulen angeordnet sind; diese Einrichtung ist zweckmässig für Wechselstrommaschinen, z. B. für die Maschinen von Wilde, Siemens, Ferranti und Mordey;
2. solche, deren Wickelungen einen beträchtlichen Peripheriewinkel überdecken, wie z. B. in den Scheibenmaschinen von Pacinotti, Rupp und Jehl, von Desroziers und Fritsche die sämmtlich für Gleichstrom bestimmt sind.

Bei der Scheibenform sieht man in der Regel von der Zufügung eines Eisenkernes ab, da ein dünner Anker in den verhältnissmässig schmalen Zwischenraum zwischen den Polflächen des Feldmagnetes eingepasst werden kann. Die Fig. 38 zeigt einen Scheibenanker für die Maschine von Fritsche; der Stromabgeber befindet sich am äusseren Umfang der Scheibe.

Ankerkerne.

Wenn Eisen in Ankern verwendet werden soll, so muss es aufgeschnitten oder geblättert sein, um die Erzeugung von Wirbelströmen zu verhindern. Eiserne Kerne müssen deshalb so getheilt werden, dass die Schnittebene senkrecht zu den Drähten steht, in denen eine elektromotorische Kraft inducirt wird, oder die Theilung muss in Ebenen parallel zu den Kraftlinien und zur Richtung der Bewegung erfolgen. Aus diesem Grunde sollen Kerne für Trommelanker aus Scheiben von dünnem Eisenbleche hergestellt werden, cylindrische oder längliche Ringanker können Kerne von ausgestanzten Ringen erhalten, die nebeneinander befestigt werden; Flachringanker müssen aus concentrischen Reifen (Bändern) bestehen.

Kerne aus gefirnisstem Eisendrahte oder dünnen Blechscheiben mit Zwischenlage von Firniss, Asbestpapier oder Glimmer, erfüllen nur theilweise die Anforderungen. Der Mangel an magnetischem Zusammenhange der Drahtkerne wirkt nämlich bis zu einem gewissen Grade schädlich; es ist besser, wenn das Eisen in derjenigen Richtung, in der es magnetisirt werden soll, nicht unzusammenhängend ist. Die Theilung in Scheiben ist deshalb besser als diejenige in Draht. Massive Eisenkerne sind ganz unzulässig, da Ströme in

ihnen entstehen und Erhitzung eintritt. Stärkere Stücke aus einem anderen Metalle als Eisen — z. B. Stückgut oder Phosphorbronze — sollten beim Aufbau eines Ankers durchaus nicht verwendet werden.

Maassgebende Gesichtspunkte für den Entwurf einer Maschine.

Wie bereits erläutert worden ist, soll der Feldmagnet eine grosse Zahl magnetischer Kraftlinien hervorbringen, während es Bestimmung des Ankers ist, die magnetischen Linien zu schneiden. Der im Anker befindliche Eisenkern kann deshalb als zum magnetischen Felde des Feldmagnetes gehörig betrachtet werden; der eigentliche Anker besteht aus den umlaufenden Kupferleitern. Elektrische Rücksichten bedingen nicht, dass der Eisenkern mit dem Anker umläuft; in mancher Hinsicht würde ein Anker, dessen Kern feststeht, wirksamer sein. Rein mechanische Rücksichten erfordern indessen sowohl für Ring- als auch für Trommelanker, dass der Kern mit der Wickelung umläuft.

In allen Dynamomaschinen ist in jedem Augenblicke die elektromotorische Kraft proportional dem Betrage der in der Secunde geschnittenen Kraftlinien. Dieser wiederum ist drei Grössen proportional:

1. der vom Feldmagnet hervorgebrachten Zahl der Kraftlinien;
2. der Zahl der Kupferleiter, die auf dem Anker miteinander verbunden sind;
3. der Geschwindigkeit, mit der die Leiter in Umlauf versetzt werden.

In Wechselstrommaschinen ändert sich in regelmässiger Periode der Betrag der in der Secunde geschnittenen Kraftlinien fortwährend; in Gleichstrommaschinen wird der Betrag von selbst auf einen Durchschnitt gebracht und infolge der Art und Weise, die Leiter um den Ring oder die Trommel in einen geschlossenen Kreis zu gruppieren und mit dem Stromabgeber zu verbinden, stetig erhalten. Es wird später gezeigt werden, dass bei Gleichstrommaschinen der gewöhnlichen zweipoligen Form die im umlaufenden Anker erzeugte elektromotorische Kraft in folgender Weise berechnet werden kann:

Es betrage die Geschwindigkeit des Ankers oder die Zahl der Umläufe in der Secunde n , die Zahl der hintereinander geschalteten Leiter auf dem Anker N , die Zahl der durch den Anker tretenden Kraftlinien \mathcal{S} ; die elektromotorische Kraft in Volt, die im umlaufenden Anker erzeugt wird, sei E . Dann gilt die Formel

$$E = nN\mathcal{S} \cdot 10^{-8}.$$

Beispiel. In einer Dynamomaschine von Kapp war $N=120$; $\mathcal{S} = 7170000$, die Geschwindigkeit betrug 780 Umläufe in der Minute oder 13 in der Secunde; die gesammte elektromotorische Kraft betrug 111 Volt.

Für Wechselstrommaschinen muss die Grundformel durch Einfügung von zwei weiteren Factoren vervollständigt werden. Derartige Maschinen sind in der Regel vielpolige; wenn \mathcal{S} die magnetische Strömung in einem der magnetischen Kreise darstellt, so wächst die gesammte magnetische Leistung auf das Product mit der Anzahl p der magnetischen Polpaare an, die den Anker umgeben. Im Weiteren ist eine Constante K hinzuzufügen, deren Zahlenwerth (von 1,8 bis 2,5 in ausgeführten Maschinen) von der verhältnissmässigen Breite der angewendeten Spulen und Polstücke abhängig ist. Die allgemeine Formel für eine Wechselstrommaschine lautet demnach

$$E = KpnN\mathcal{S} \cdot 10^{-8}.$$

Beispiel. In einer Kapp'schen Wechselstrommaschine ist $K = 2,3$, $p = 6$, $N = 1190$, $\mathcal{S} = 1250000$, die Geschwindigkeit beträgt 700 Umläufe in der Minute, so dass $n = 11,6$ ist. Dann wird $E = 2360$.

Aus der Formel ersieht man, dass die elektromotorische Kraft, mit der eine Dynamomaschine arbeitet, durch drei Factoren bestimmt wird; sie lässt sich durch Vergrösserung eines Factors oder aller drei Factoren erhöhen. Für eine gegebene Maschine ist N gleichbleibend; die magnetische Strömung \mathcal{S} lässt sich über die Leistungsfähigkeit des Eisenkernes, Kraftlinien aufzunehmen, nicht steigern.

Will man eine neue Maschine entwerfen, so ist klar, dass man jedem der drei Factoren jeden beliebigen Werth beilegen kann, wenn nur das verlangte Product erzielt wird. Es ist demnach eine Frage der Zweckmässigkeit, ob man beim Entwurf einer Maschine den einen oder den anderen Factor grösser wählen will. Um \mathcal{S} zu steigern, braucht man einen grösseren Eisenquerschnitt und einen verhältnissmässig starken Feldmagnet; dies setzt grössere Kosten für das Eisen voraus. Zur Vergrösserung von N muss das Gewicht und deshalb der Kostenbetrag für die Kupferleiter erhöht werden; denn der Querschnitt der Leiter hängt von dem fortzuleitenden Strome ab, während die elektromotorische Kraft durch die Zahl der Leiter, sowie durch den Betrag der geschnittenen Kraftlinien bedingt wird. Die Erfahrung zeigt ferner, dass durch Vergrösserung der Kupfermasse auf einem Ankerkerne gegebener Grösse über eine gewisse Grenze hinaus eine ernstliche Schwierigkeit auftritt. Die

Maschine läuft dann nicht mehr ohne Funkenbildung an den Bürsten. Die Steigerung der Geschwindigkeit n begegnet mechanischen Schwierigkeiten wegen der Schmierung und der Neigung einzelner Theile, abgeschleudert zu werden; durch mechanische Rücksichten ist daher für die Geschwindigkeit eine Grenze gesetzt. Vor einigen Jahren ist man in der Praxis zur Ermässigung der Geschwindigkeit übergegangen, auch zur Herabminderung der Kupfermasse, während die Eisenmasse verhältnissmässig gross gewählt worden ist. Dadurch stellen sich nicht allein die gesammten Kosten einer Maschine niedriger als bei dem umgekehrten Verhältniss von Kupfer und Eisen, sondern es verringert sich auch die Ausgabe und Mühe für die Unterhaltung. Maschinen mit einem verhältnissmässig massiven und kräftigen Feldmagnet geben wenig Funken, erfordern geringere Aufmerksamkeit für die Regulirung, verschleissen weniger an Bürsten und am Stromabgeber als Maschinen mit einem schwachen Feldmagnet. Neuerdings ist indessen wieder einige Neigung zur entgegengesetzten Richtung hervorgetreten. Denn wenn durch eine besondere Bauart die Geschwindigkeit und das Gewicht des Kupfers auf dem Anker sich steigern lässt, ohne die Vortheile aufzugeben, die durch einen kräftigen Feldmagnet erzielt werden, so wächst bei einer geringen Vermehrung des Gesamtgewichtes und der ersten Kosten die Leistung einer Maschine verhältnissmässig an.

Methoden zur Erregung des Feldmagnetismus.

Die fünf Methoden zur Erregung des nutzbaren magnetischen Feldes zerfallen in zwei Hauptgruppen, je nachdem der Magnetismus der Maschine von dem eigenen Anker oder aus irgend einer anderen Quelle unterhalten wird.

Magneto-Dynamomaschine.

Bei den ältesten Maschinen wurde kein Versuch gemacht, durch die Maschine selbst den Magnetismus zu erregen; dieser wurde lediglich unter Anwendung eines Dauermagnetes aus Stahl hervorgebracht. Leider vermindert sich der Dauermagnetismus von Stahlmagneten allmählich, wird auch durch jeden mechanischen Stoss oder durch Erzitterungen, denen die Maschine unterliegt, geschwächt.

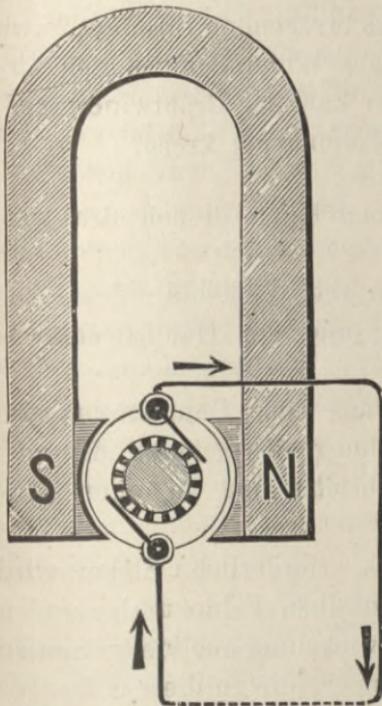
Die magnetoelektrische Maschine oder Magneto-Dynamomaschine, wie sie in Fig. 39 dargestellt ist, findet sich als kleine Maschinenform zahlreich vor.

Sie leidet an dem ernstlichen Nachtheile, dass sie schwerer und massiger als andere Dynamomaschinen von gleicher Leistungsfähigkeit ist, weil Stahl nicht bis zu dem hohen Grade dauernd magnetisirt werden kann, wie Schmiede- oder Gusseisen oder Stahl es zeitweise gestatten.

Besonders erregte Dynamomaschine.

Jedenfalls war es ein Fortschritt, an Stelle der Stahlmagnete Elektromagnete anzuwenden, die mit Strömen aus einer unabhängigen Stromquelle, z. B. einer galvanischen Batterie, erregt wurden.

Die besonders erregte Dynamomaschine (Fig. 40) steht deshalb an zweiter Stelle in der Reihe der Ent-



[Fig. 39. Magneto-Dynamomaschine.

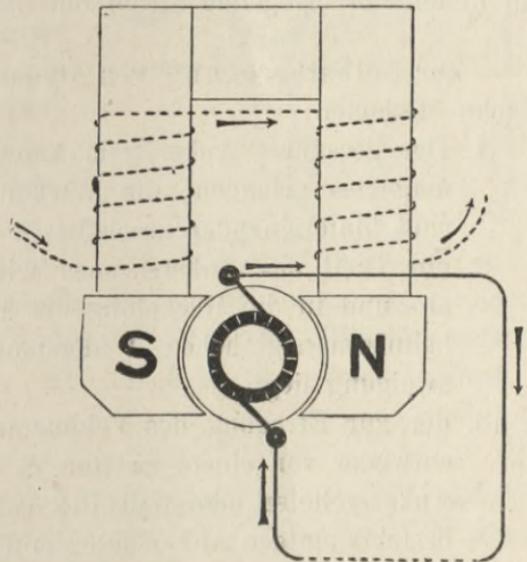


Fig. 40. Besonders erregte Dynamomaschine.

wicklung. Wenngleich diese Maschine von Faraday benutzt wurde, kam die Methode doch nicht eher in Aufnahme, als bis Wilde im Jahre 1866 eine kleine Hilfsmagnetomaschine anwendete, um den zur Erregung der Feldmagnete einer grösseren Maschine nothwendigen Strom zu liefern.

Die besonders erregte Dynamomaschine besitzt mit der Magneto-maschine die Eigenschaft, dass ihr Feldmagnetismus und also auch die elektromotorische Kraft unabhängig von Widerstandsänderungen im Arbeitskreise sind, wenn man von Gegenwirkungen des Ankerstromes absieht.

Die Thätigkeit von Maschinen der vorbezeichneten Art kann in dreierlei Weise geregelt werden: durch Aenderung der Geschwindigkeit oder des Magnetismus, der den Anker durchdringt, oder durch Verschiebung der Bürsten. Schon früher regelte man die elektromotorische Kraft von Magnetomaschinen in der Weise, dass ein bewegliches Eisenstück mehr oder weniger über die Pole des Feldmagnetes geschoben werden konnte und als magnetische Nebenschliessung diente, um Magnetismus vom Anker abzulenken.

Bei besonders erregten Maschinen lassen sich zwei andere Methoden zur beliebigen Herabminderung des wirksamen Magnetismus anwenden, zunächst durch Schwächung des erregenden Stromes, etwa durch Einschaltung von mehr oder weniger Widerstand in den Erregungskreis, dann durch Aenderung in der Zahl der Drahtwindungen, in denen der erregende Strom um den Feldmagnet kreist.

Zur Selbsterregung von Dynamomaschinen dienen drei einfache Methoden:

1. Der gesammte Ankerstrom kann in die Wickelung des Feldmagnetes gelangen; die Wickelung und der Hauptstromkreis sind hintereinander geschaltet;
2. ein Theil des Ankerstromes wird aus dem Hauptstromkreise ab- und in die Wickelung des Feldmagnetes geleitet, die verhältnissmässig hohen Widerstand besitzt und in einer Abzweigung liegt;
3. der zur Erregung des Feldmagnetes erforderliche Strom wird entweder von einem zweiten in demselben Felde umlaufenden Anker geliefert oder (falls die Ankerwicklung aus vielen Spulen besteht) einigen Ankerspulen entnommen, die zu diesem Zwecke besonders geschaltet werden.

Reihen- oder Hauptstrommaschine.

Die Reihen- oder gewöhnliche Maschine (Fig. 41) besitzt nur einen Stromkreis. Es ist ein Nachtheil dieser Maschine, dass sie erst nach Erlangung einer bestimmten Umlaufgeschwindigkeit in Thätigkeit tritt oder nicht eher, als bis der Widerstand des Stromkreises unterhalb einer gewissen Grenze liegt; die Maschine versagt die Magnetisirung des eigenen Magnetes, sobald zu viel Widerstand und eine zu geringe Geschwindigkeit vorhanden ist. Die geringste Geschwindigkeit für die Selbsterregung bildet einen Maassstab für die Güte des magnetischen Kreises. Reihenmaschinen sind auch der

Umkehrung der Polarität unterworfen; wegen dieses bedenklichen Nachtheiles ist die Maschinenart zur Erzeugung von Metallniederschlägen oder zum Laden von Sammlern nicht zu gebrauchen. Jede Zunahme des Widerstandes der Reihenmaschine vermindert ihre Fähigkeit zur Stromgebung, weil durch den Widerstand der Strom in den Wickelungen des Feldmagnetes geschwächt wird und sich demnach auch der Betrag des wirkenden Magnetismus verringert.

Befinden sich hintereinander geschaltete Lampen (wie in einem Bogenlichtkreise) in dem Stromkreise einer Reihenmaschine, so wird durch Zuschalten einer Lampe der Widerstand des Kreises erhöht und die Fähigkeit zur Stromgebung verringert. Wenn anderseits Lampen nebeneinander geschaltet sind, so vermindert die Einschaltung von Lampen nicht allein den Widerstand des Stromkreises, sondern es werden die Feldmagnete auch durch den angewachsenen Strom stärker erregt, so dass die Gefahr, einen zu starken Strom zu erhalten, mit der Zahl der eingeschalteten Lampen steigt.

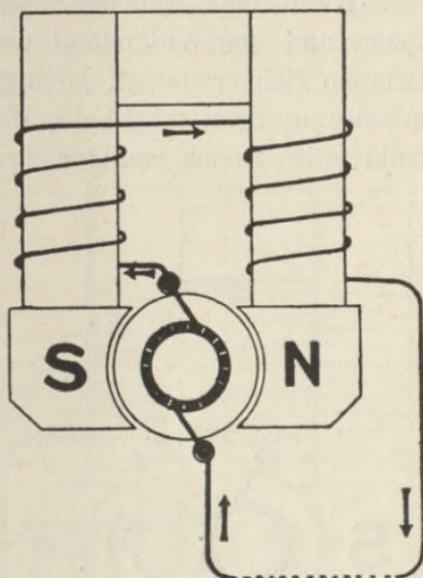


Fig. 41. Reihenmaschine.

Nebenschlussmaschine.

In der Maschine mit Nebenschlusswicklung trägt der Feldmagnet viele Windungen dünnen Drahtes, um nur einen geringen Theil des gesammten im Anker erzeugten Stromes zu empfangen. Diese Wickelung wird mit den Bürsten der Maschine verbunden und bildet eine Abzweigung oder einen Nebenschluss zum äusseren Stromkreise (Fig. 42).

Nebenschlussmaschinen sind weniger der Umkehrung ihrer Polarität unterworfen als Reihenmaschinen. Mit Rücksicht auf den höheren Preis des dünnen Drahtes der Abzweigungswickelung sind die Beschaffungskosten etwas höher als die einer Reihenmaschine von gleicher Leistung; der Aufwand an elektrischer Energie zur Erhaltung des Magnetismus ist indessen praktisch in beiden Fällen der gleiche. Um einen Elektromagnet in gleich hohem Grade zu magnetisiren, gleichgültig, ob die Spulen aus vielen Windungen

eines dünnen oder wenigen Windungen eines dicken Drahtes bestehen, wird gleiche Aufwendung elektrischer Energie nothwendig, unter der Voraussetzung, dass das Gewicht des zur Spule verwendeten Kupfers und die Maasse der Wickelung in beiden Fällen gleich sind.

Wenn eine Nebenschlussmaschine parallel geschaltete Lampen speist und der Widerstand des Stromkreises durch Zuschalten von Lampen sich ermässigt, so nimmt die Stromstärke nicht verhältnissmässig zu; denn sobald der Widerstand des Hauptstromkreises etwas sinkt, fliesst auch weniger Strom durch den Nebenschluss, und der

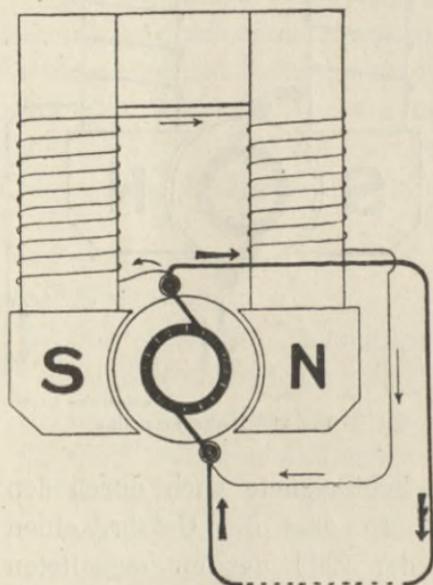


Fig. 42. Nebenschlussmaschine.

Magnetismus nimmt ab: eine derartige Maschine vermag sich nichtsdestoweniger ziemlich gut selbst zu regeln, wenn nur der Widerstand ihrer Ankerwicklung sehr gering ist. Schaltet man eine Anzahl Lampen hintereinander, so wächst die stromgebende Kraft der Maschine mit der erhöhten Anforderung des Stromkreises, denn die Hinzufügung von Widerstand im äusseren Stromkreise bewirkt das Wachsen des Stromantheiles im Nebenschlusse, in dem die Feldmagnete liegen, und das magnetische Feld nimmt infolgedessen an Stärke zu.

Die elektromotorische Kraft der Nebenschlussmaschine lässt sich durch Einschaltung eines veränderlichen Widerstandes im Nebenschlusse regeln. Eine Abänderung der Nebenschlussmethode bildet die Verwendung einer dritten Bürste, die gegen den Stromabgeber an einem Punkte zwischen dem höchsten und niedrigsten Potential angelegt wird. Die Enden der Erregerwicklung sind mit der dritten Bürste und einer der beiden anderen Bürsten verbunden, so dass nur ein Theil der im Anker erzeugten elektromotorischen Kraft auf die Wickelung wirkt.

Selbsterregende Dynamomaschine mit getrenntem Erregerkreise.

Bei dieser dritten Maschinenart (Fig. 43) sind die Feldmagnetwickelungen so angeordnet, dass sie einen Theil eines vom Hauptstromkreise vollständig getrennten Kreises bilden, der aber mit Strom

aus Wickelungen versehen wird, die im Felde der Maschine umlaufen. Man kann dieses Ziel in zweierlei Weise erreichen: 1. Man lässt einen zweiten Anker zwischen denselben Feldmagneten umlaufen, um den erregenden Strom zu erzeugen; jeder Anker besitzt einen Stromabgeber; 2. einige Ankerspulen werden mit einem eigenen Stromabgeber verbunden, um den erregenden Strom zu liefern. Holmes beschrieb etwa im Jahre 1868 eine Maschine mit 20 Spulen auf dem Anker; zehn von diesen lieferten Wechselströme für die Lampen, die übrigen zehn, oder ein Theil davon, konnten mit einem besonderen Stromabgeber derartig verbunden werden, dass sie den Erregerstrom für die Feldmagnete lieferten. Ruhmkorff erreichte dasselbe durch eine zweite Drahtwicklung auf dem Siemens'schen I-Anker, der demnach an jedem Ende mit einem Stromwender versehen wurde.

Die Wirkung der Erregung mittels besonderer Wickelung ist nahezu gleich der Wirkung des Nebenschlusses; erstere besitzt indessen den Vorzug, dass der Strom zur Magnetisirung mit niedriger Spannung abgenommen werden kann; bei Maschinen für hohe

Spannung ist dies vorzuziehen. Für Maschinen zu 1000 Volt und mehr würden die Kosten des feinen Drahtes zum Nebenschluss hinderlich sein.

Jede der aufgezählten fünf Betriebsarten kann für Gleichstrommaschinen Verwendung finden. Jede der fünf Arten zur Erregung des Feldmagnetismus hat ihre Vorzüge in besonderen Fällen, keine von ihnen ist jedoch vollkommen. Für Wechselstrommaschinen sind weder Reihen- noch Nebenschlusswickelungen verwendbar.

Keine der Arten¹⁾ sichert bei gleichförmiger Geschwindigkeit der Betriebsmaschine gleichbleibende Klemmenspannung oder Strom von gleichmässiger Stärke, falls die Widerstände im Stromkreise sich ändern.

1) Eine Ausnahme bildet eine Nebenschlussmaschine mit Sayers' Einrichtung zur Rückwärtsverschiebung der Bürsten; vergl. Kapitel XVI.

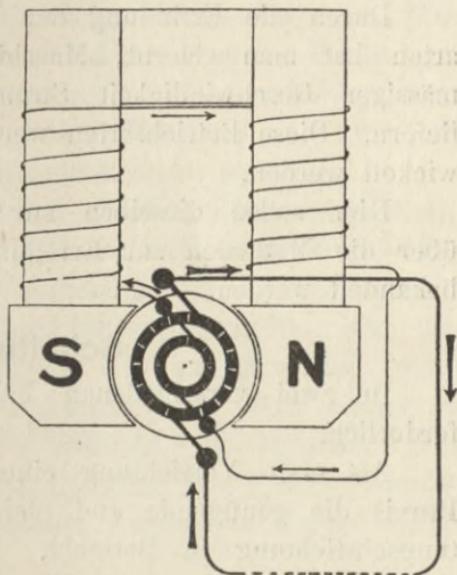


Fig. 43. Selbsterregende Maschine mit besonderem Erregerkreise.

Wenn die Lampen im Stromkreise einer Dynamomaschine entweder sämmtlich zugleich eingeschaltet oder ausgeschaltet werden, d. h. wenn die Leistung der Maschine gleichbleibend sein könnte, so würde es ohne Belang sein, wie die Erregung des Feldmagnetismus stattfände, sei es im Hauptkreise oder im Nebenschluss, falls nur die Geschwindigkeit dieselbe bliebe.

Aber in Netzen mit veränderlicher Lampenzahl sichert keine der einfachen Erregungsmethoden die Gleichmässigkeit der elektrischen Spannung.

Durch die Erfindung der Vereinigung mehrerer Wickelungsarten hat man gelernt, Maschinen herzustellen, die bei gleichmässiger Geschwindigkeit Strom von gleichbleibender Spannung liefern. Diese Betriebsarten werden im Kapitel XI ausführlich entwickelt werden.

Hier sollen dieselben zur Vervollständigung der Uebersicht über die Methoden zur Erregung der Feldmagnete ebenfalls kurz behandelt werden.

Schaltungsarten.

In zwei verschiedenen Fällen wird die Selbstregelung erforderlich.

Als erste Verrichtung einer Dynamomaschine kommt in der Praxis die genügende und gleichmässige Speisung einer Beleuchtungseinrichtung in Betracht. Da die Lampen stets¹⁾ entweder nebeneinander oder hintereinander geschaltet werden, so ist es klar, dass im ersteren Falle eine gleichbleibende Spannung und im letzteren Falle eine gleichbleibende Stromstärke nothwendig wird.

Denken wir uns eine Maschine mit einem widerstandslosen Anker, ohne entmagnetisirende Gegenwirkung, deren Feldmagnete von einer anderen unabhängigen und unveränderlichen Stromquelle erregt werden. Bei gleichbleibender Geschwindigkeit erhalten wir dann stets gleiche Klemmenspannung, wie auch der Widerstand im Stromkreise sich stellt. Sobald die Maschine jedoch inneren Widerstand besitzt, wird die Klemmenspannung geringer

1) Es kommt vor, dass Glühlampen zu zwei oder drei in Reihen, und solche Reihen parallel geschaltet sind. Seltener findet man parallel geschaltete Lampen im Stromkreise hintereinander befindlicher Bogenlampen, die einen gleichbleibenden Strom erfordern. Die Vertheilung fällt aber stets unter eine der betrachteten Schaltungen.

als die elektromotorische Kraft; der Unterschied wird je nach dem inneren Widerstande und dem Strome grösser sein. Jede widerstandslose, besonders erregte oder Nebenschlussmaschine würde sich selbst regeln.

Der Abfall der Spannung in Folge des inneren Widerstandes und der Ankerrückwirkung ist nahezu proportional dem aus der Maschine entnommenen Strome; er ist gross, wenn der Strom stark, und gering, wenn der Strom schwach ist. Also können wir eine Einrichtung treffen, welche diese Wirkungen durch eine gleichfalls dem Strome proportionale Zunahme des Magnetismus ausgleicht. Dies geschieht dadurch, dass man auf den Feldmagnet einige Windungen dicken Drahtes aufbringt, welche den Strom auf seinem Wege vom Anker zu den Lampen führen. Eine solche Maschine giebt innerhalb bestimmter Grenzen eine gleichbleibende Klemmenspannung.

Zur Vertheilung von Energie bei gleicher Klemmenspannung gehören also Maschinen, die eine Reihenwicklung in Verbindung mit irgend einer unabhängigen gleichbleibenden Hilfserrregung besitzen.

Man hat es bis jetzt als undurchführbar gefunden, eine Art der gemischten Wickelung anzugeben, die zur Erzielung eines Stromes von gleichbleibender Stärke dienen soll. Man nimmt zu anderen Arten der Regelung seine Zuflucht, um Maschinen für Bogenlampen in Reihen herzustellen, die Strom von gleichbleibender Stärke liefern müssen. Diese Maschinen werden im Kapitel XVIII und XXIX erläutert werden.

Schaltungen für Gleichspannung.

Folgende Schaltungen sind die möglichen Lösungen der Aufgabe, Strom von gleichbleibender Spannung zu liefern.

1. Reihenschaltung bei besonderer Erregung (Deprez).

Eine besondere und gleichbleibende Felderregung aus einer selbständigen Stromquelle bringt die Spannung bei offenem Stromkreise auf die gewünschte Höhe. Um den Verlust an Spannung im Widerstande und durch die Rückwirkung des Ankers zu decken, fügt man eine Hauptstrom- oder Reihenwicklung hinzu, vergl. Fig. 44.

2. Reihenschaltung in Verbindung mit Erregung durch eine Magnetomaschine (Perry).

Die ursprüngliche Erregung kann durch einen stählernen Dauermagnet erzeugt werden; Professor Perry hat indessen eine allgemeinere Lösung erzielt, indem er eine besondere, ebenfalls mit

einer gleichförmigen Geschwindigkeit getriebene Magnetmaschine in den Stromkreis einer Reihenmaschine einschaltet, so dass in dem Kreise eine gleichbleibende elektromotorische Kraft, und zwar gleich derjenigen erzielt wird, die zwischen den Endpunkten der Hin- und Rückleitung bestehen soll. Die Reihenmaschine dient dann nur dazu, die Spannungsverluste zu decken.

Die Verbindung eines Dauermagnetes mit Elektromagneten bei ein und derselben Maschine ist viel älter als die von Deprez oder Perry stammenden Angaben; sie wurde von Hjorth schon im Jahre 1854 beschrieben.

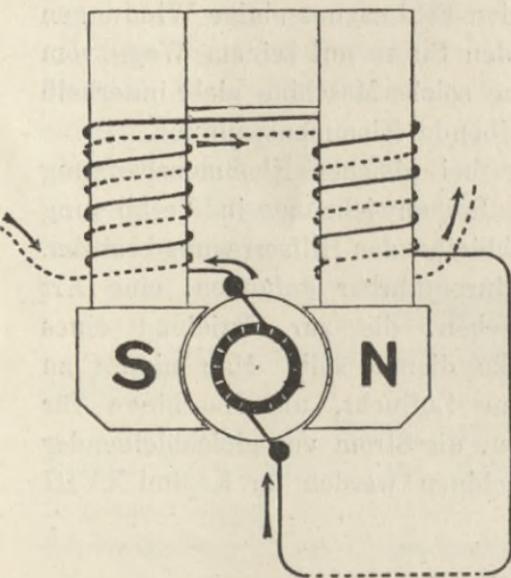


Fig. 44. Reihenmaschine mit besonderer Erregerwicklung.

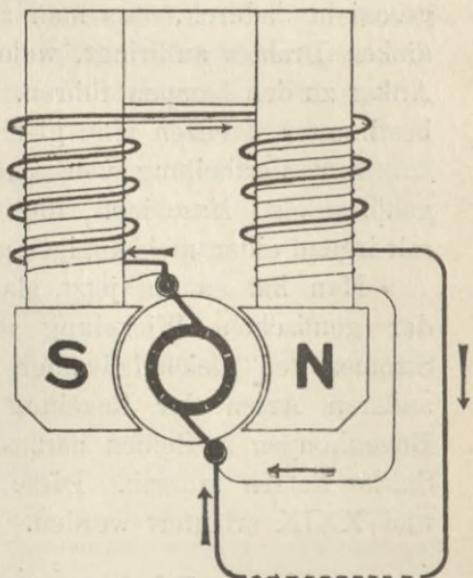


Fig. 45. Maschine mit Reihen- und Nebenschlusswicklung (Verbundmaschine).

3. Reihenschaltung in Verbindung mit einem Nebenschluss.

Eine Maschine, die nach Fig. 45 gewickelt ist, so dass die Feldmagnete theilweise durch den Hauptstrom und theilweise durch einen abgezweigten Strom erregt werden, der von den Bürsten ausgeht, wurde von Brush¹⁾ schon im Jahre 1878 verwendet. Seine Maschine war nahezu selbstregelnd; die Spannungsänderung betrug weniger als 1 Volt bei einem weiten Bereiche der Stromstärke.

1) Der abgezweigte Stromkreis, ursprünglich „teazer“ (Reizer) genannt, wurde zuerst bei Maschinen für Metallniederschlag verwendet, und zwar in der Absicht, die Umkehrung des Stromes aus Anlass der Umkehrung der Magnetisierung der Feldmagnete zu vermeiden, wurde indessen an einigen andern Mustern von Maschinen mit Rücksicht auf seinen Nutzen zur Gleichhaltung des Stromes beibehalten.

Die Spannung hängt von dem Grade ab, bis zu dem der Magnetismus erregt ist, wenn der Nebenschluss allein bei offenem Stromkreise wirkt.

Die Reihenwicklung mit Nebenschluss bezeichnet man gewöhnlich als gemischte Wickelung oder auch als Verbundwicklung¹⁾.

4. Reihenmaschine in Verbindung mit langem Nebenschlusse.

Im Jahre 1882 schlug der Verfasser diesen Namen für eine der vorhergehenden ähnliche Schaltung vor. Wenn die Magnete theilweise durch die Reihenwicklung, theilweise durch Windungen von dünnerem Drahte erregt werden, der als Nebenschluss nicht zu den Bürsten, sondern an den Klemmen des äusseren Stromkreises liegt, so würde die Klemmenspannung noch besser gleichbleibend sein.

5. Reihenschaltung in Verbindung mit einer besonderen Wickelung.

Diese Methode ist für Gleichstrommaschinen anscheinend nicht versucht worden. Für Wechselstrommaschinen wurde eine Abänderung von Zipernowsky mit Erfolg angewendet. Die Erregung im Hauptstromkreise wurde durch eine Erregung ersetzt, die aus dem Hauptstromkreise mittels eines kleinen Umsetzungsapparates erlangt und durch einen Stromwender gleichgerichtet worden war.

1) Die Erfindung der „Reihen- und Nebenschluss-Wickelung“ wird von Verschiedenen beansprucht. Jedenfalls wendete Brush die Schaltung zuerst an, ob mit Kenntniss aller ihrer Vortheile, bleibt zweifelhaft. Auch von S. A. Varley wurde sie auf Grund seines Patentes Nr. 4905 aus dem Jahre 1876 in Anspruch genommen, da nach demselben zwei Kreise von verschiedenem Widerstande vorhanden waren, die beide Wickelungen des Feldmagnetes enthielten und beide zu den Lampen führten. Varley erlangte eine Entscheidung der schottischen Gerichtshöfe, dass seine Anordnung älter sei als die von Brush. Von Sinsteden wurde die gemischte Wickelung 1871 in Pogg. Annalen (Supplem.-Bd. 5, S. 651) beschrieben. Als Schaltung mit einigen Vortheilen wurde sie von C. W. Siemens in den Philosophical Transactions, März 1880, bezeichnet. Sie wird auch für Lauckert beansprucht (vergl. Anmerk. von Boistel, S. 100 seiner Uebersetzung der ersten Auflage dieses Werkes), für Paget Higgs (Electrical Review, Bd 11, S. 280, und Electrician, 23. Dez. 1882), für J. W. Swan, vergl. Bosanquet (ebenda, 9. Dez. 1882), für J. Swinburne (ebenda, 23. Dez. 1882), für S. Schuckert (ebenda, 13. Okt. 1883); in Amerika von Edison; sie wurde patentirt für Crompton und Kapp (ebenda, 9. Juni 1883). Vergl. auch Hospitalier (L'Électricien, Nr. 20. 1882). Man vergleiche auch eine Reihe von Artikeln von Gisbert Kapp in The Electrician, Bd. 10, beginnend mit 16. Dez. 1882. Vergl. ferner eine Abhandlung von Louis Bell in The Electrical World, Bd. 16, S. 333. 1891.

Kapitel IV.

Wirkungen und Gegenwirkungen im Anker.

In dem vorliegenden Kapitel sollen hauptsächlich Gleichstrommaschinen mit Ankern der Ring- und Trommelform in einfachem magnetischen Felde behandelt werden, wie ein solches von dem in der Regel bei diesen Maschinen verwendeten zweipoligen Feldmagnet hervorgebracht wird. Vielfach jedoch lassen sich die nachfolgenden

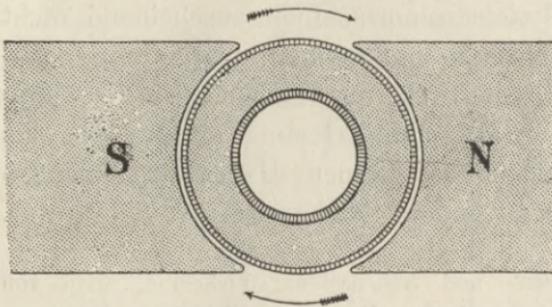


Fig. 46. Ringanker zwischen den Polen eines Feldmagnetes.

Betrachtungen auch auf vielpolige Maschinen mit Scheibenankern und auf Wechselstrommaschinen anwenden.

Es werde ein nach rechts umlaufender Anker (von dem Ende aus gesehen, an dem der Stromabgeber befestigt wird)

vorausgesetzt; ferner werde angenommen, dass der Nordpol des Feldmagnetes rechts liege, wie in den Fig. 39 bis 45, so dass die magnetischen Linien von rechts nach links verlaufen. Auch die Wickelung der Ankerkerne sei nach rechts herum aufgewunden. Hält man dies als Regel fest, so lässt sich sehr leicht ermitteln, wie ein Wechsel in einer dieser Bedingungen die Induction der elektromotorischen Kraft beeinflusst.

Die Fig. 46 stellt die Endansicht eines Ringankers dar. Die vom N-Pol austretenden magnetischen Linien gehen durch den Zwischenraum von rechts nach links und dringen in das Eisen des Ankers, dieses durchsetzend, verlaufen dann durch den Zwischenraum zur Linken und treten zum S-Pol des Feldmagnetes über (Fig. 60). Sowie die Kupferdrähte oder Leiter des Ankers einer nach dem anderen in den Zwischenraum übertreten, schneiden

sie die magnetischen Linien. Jeder Leiter tritt oben aus dem Zwischenraume aus, bewegt sich über dem höchsten Theile des Ankers von links nach rechts und schneidet wieder die magnetischen Linien, indem er rechts in dem Zwischenraume sich abwärts bewegt. Bei Anwendung der auf Seite 24, Anmerkung 1, erwähnten Regel finden wir die Richtung der inducirten elektromotorischen Kräfte in den umlaufenden Leitern in folgender Weise: In den Leitern, die in dem linken Zwischenraume empor steigen, ist die elektromotorische Kraft gegen den Beobachter gerichtet, während sie in den Leitern, die im rechten Zwischenraume abwärts sich bewegen, von dem Beobachter weg ihre Richtung nimmt. Setzen wir voraus, dass diese elektromotorischen Kräfte Ströme erzeugen¹⁾, so lässt sich sagen, dass die Ströme in denjenigen Leitern nach dem Beobachter hin fließen, die im linken Zwischenraume emporsteigen, und in denjenigen, die im rechten Zwischenraume niedergehen, in der Richtung vom Beobachter weg fließen. Ist der Anker als Ring gewickelt, so fließen die Ströme, die in der einen Richtung im Zwischenraum verlaufen, in der anderen Richtung an der Innenseite des Ringes wieder rückwärts. Ist der Anker als Trommel gewickelt, so treten die Ströme am Ende des Kernes durch die zu diesem Zwecke vorhandenen Verbindungsleiter von einer Seite quer herüber zur andern.

Betrachten wir nun die Art und Weise, wie die Wickelungen auf dem Anker miteinander verbunden werden. Sei eine Ring- oder Trommelwicklung vorhanden, so sind die Leiter symmetrisch um einen symmetrischen Kern gewickelt und zu einer geschlossenen Wickelung miteinander verbunden, während in regelmässigen Abständen Verbindungsstücke zu den einzelnen Stäben des Stromabgebers führen. Die Fig. 34 auf Seite 39 stellt eine einfache Ringwicklung dar, die aus 32 Windungen zu 8 Gruppen besteht, so dass jede Gruppe 4 Windungen enthält. Das Ende jeder Abtheilung ist mit dem Anfange der nächsten Abtheilung verbunden. Der Stromabgeber besteht aus 8 Stäben; jede Wickelungsabtheilung ist mit ihren Endpunkten zu zwei nebeneinander liegenden Stäben des Strom-

1) In allen als Stromerzeuger verwendeten Maschinen verlaufen die von den elektromotorischen Kräften erzeugten Ströme in derselben Richtung wie die erzeugenden Kräfte. Es ist indessen wohl festzuhalten, dass in Maschinen, die als Elektromotoren dienen, die Ströme durch eine überwiegende elektromotorische Kraft von Aussen her eingeleitet werden, und dass die im Anker der Triebmaschinen inducirten elektromotorischen Kräfte stets in einer der Richtung des herrschenden Stromes entgegengesetzten Richtung verlaufen.

abgebers geführt. Die Bürsten sind so gezeichnet, dass sie den höchsten und niedrigsten Stab des Stromabgebers berühren. Da die Wickelungen auf dem Ringe rechtsgängig gewunden sind, so ergibt sich in Uebereinstimmung mit den vorhergehenden Paragraphen, dass die inducirten Ströme in den aufsteigenden Windungen der linken Hälfte des Ringes vom niedrigsten Punkte zum höchsten aufsteigen, und die Ströme in der rechten Hälfte des Ringes auch vom niedrigsten Punkte zum höchsten Punkte verlaufen. Die beiden Ströme werden sich am oberen Stabe des Stromabgebers vereinigen und zusammen in die obere Bürste abfließen (die man dementsprechend für die positive halten kann); danach gelangt der Strom in den äusseren Kreis, kehrt zur unteren, negativen Bürste zurück und tritt am untersten Stabe des Stromabgebers wieder in den Anker ein, theilt sich in zwei Theile und fliesst in die beiden Hälften der Wickelung zurück. Wären die Leiter auf dem Anker linksgängig gewunden (oder entsprechend verbunden), so würde die untere Bürste die positive, die obere die negative sein. Diese Darlegung passt auch für eine Trommelwickelung; mit Rücksicht auf das Uebergreifen der beiden Hälften der Windungen sind die Stromwege aber nicht so bequem zu übersehen.

Es ist noch zu bemerken, dass der Strom nach dem Eintritt in die Ankerwickelungen, und nachdem er sich auf zwei Wege vertheilt hat, von einer Abtheilung der Wickelung in die nächste fliesst, ohne dass er in einen Stab des Stromabgebers gelangt, bis sich beide Theile an der entgegengesetzten Seite vereinigen und in den Stab des Stromabgebers übertreten, der gerade unter der Bürste sich fortbewegt. Zu den Zeitpunkten, in denen einer der Stäbe des Stromabgebers gerade ausser Contact mit der Bürste treten will, der andere aber gerade mit der Bürste in Berührung kommt, liegt die Bürste an zwei benachbarten Stäben an und führt für einen Augenblick einen Kurzschluss einer Abtheilung der Wickelungen herbei.

Während dieses Vorganges fließen die beiden durch die Wickelungen gelangenden Stromtheile zu den beiden Stäben des Stromabgebers und vereinigen sich, indem sie in dieselbe Bürste fließen. Es ist einleuchtend, dass für einen Strom, der an irgend einem Punkte eines geschlossenen Stromkreises (z. B. die Windungen eines Ringankers) eingeführt und an einem anderen Punkte herausgeführt wird, zwei Stromwege vorhanden sind. Bei vielpoligen Maschinen sind, wie wir später sehen werden, in vielen Fällen mehr wie zwei

Stromwege vorhanden, und der Strom verzweigt sich mehrfach auf seinem Wege durch die Ankerwicklung.

Wenn die magnetischen Linien in einem Theile des Zwischenraumes dichter zusammenliegen als in einem anderen Theile, so ist klar, dass die in den einzelnen Windungen bei dem Durchschneiden der magnetischen Linien erzeugten Kräfte ungleiche Grösse besitzen; die grösste elektromotorische Kraft wird in denjenigen Leitern erzeugt, die durch einen Theil des magnetischen Feldes sich bewegen, wo die Linien den Zwischenraum in grösster Dichte kreuzen. Wie indessen die elektromotorischen Kräfte in den einzelnen Leitern beschaffen sein mögen, so ist einleuchtend, da die Kräfte schliesslich alle sich vereinigen, dass die gesammte elektromotorische Kraft in jeder Wickelungshälfte von Bürste zu Bürste gleich der Summe der elektromotorischen Kräfte der einzelnen Wickelungsabtheilungen sein muss. Dies ist eine bedeutsame, wohl zu beachtende Thatsache.

Induction in einem gleichförmigen wagerechten magnetischen Felde.

Für eine ideale einfache Dynamomaschine ist gezeigt worden, dass die Induction in der sich drehenden Schleife oder Wickelung in derjenigen Lage Null ist, in der die Wickelung sich im Durchmesser der Stromwendung befindet, und dass die Induction bis zu ihrem Maximum bei ungefähr 90 Grad anwächst (wie der Sinus des Winkels) [vergl. Fig. 18, Seite 32]. Dies trifft für den idealen Fall zu, dass die magnetischen Linien gerade und wagerecht mit überall gleicher Dichtigkeit verlaufen. In wirklichen Maschinen ist die Vertheilung der magnetischen Linien in dem Zwischenraume verschieden und nicht stets symmetrisch. Die Fig. 47, die eine Sinuscurve darstellt, gibt uns in deren Höhen ein Bild des Ganges der Induction von 10 zu 10 Grad während einer Drehung. Besitzt beispielsweise ein Ringanker 36 Abtheilungen, so dass die Abtheilungen sich auf je 10 Grad erstrecken, so befinden sich die am geringsten wirkenden Abtheilungen bei 0 und 180 Grad, die wirksamsten bei 90 und 270 Grad. In allen gewöhnlichen, mit geschlossener Wickelung versehenen Ankern werden die einzelnen Abtheilungen indessen so verbunden, dass die in der ersten Abtheilung inducirte elektromotorische Kraft sich zu der in der zweiten und die in der dritten inducirte sich zu den beiden addirt und so weiter im Kreise herum, bis zur anderen Bürste. Die einzelnen elektromotorischen

Kräfte summiren sich ebenso wie die einer galvanischen Batterie, deren Zellen hintereinander geschaltet sind (Fig. 48).

Ein Kreis so vereinigter Zellen, deren eine Hälfte derart angeordnet ist, dass der Strom in ihnen den entgegengesetzten Weg im Kreise zu durchlaufen bestrebt ist, bildet eine passende Darstellung der Induction in den Abtheilungen eines Ringankers. Wenn noch deutlich zu machen wäre, dass diejenigen Abtheilungen, welche 90 Grad von den Bürsten abliegen, stärker in ihrer inducirenden Wirkung sind als die, die nahe den Bürsten sich befinden, so würde die Analogie noch vollständiger sein.

Nachdem wir nun wissen, wie die Induction in den einzelnen Wickelungen bezw. Abtheilungen um den Ring herum steigt und

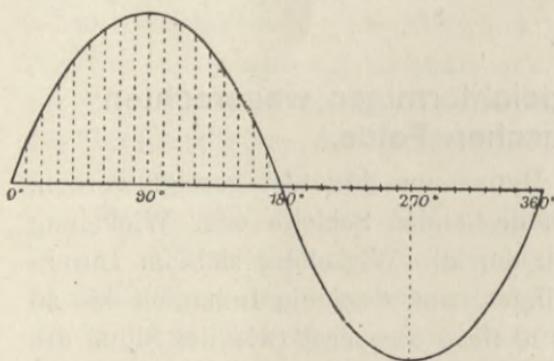


Fig. 47. Curve der inducirten elektromotorischen Kraft.

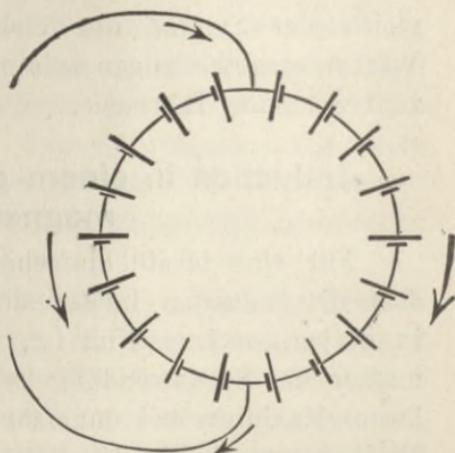


Fig. 48. Ring aus Batteriezellen, beide Hälften nebeneinander.

fällt, wollen wir, um die gesammte Wirkung zu finden, das Ergebniss der Summirung der einzelnen elektromotorischen Kräfte suchen.

Wir haben die Wirkung aller Abtheilungen von der negativen Bürste bei 0 Grad auf der einen Seite bis zur positiven bei 180 Grad auf der anderen Seite zu addiren: wegen der Symmetrie wird das Ergebniss in jeder Hälfte des Ringes das gleiche sein.

Nehmen wir die Seite von 0 Grad durch 90 Grad bis 180 (in den Fig. 20 und 46 links). Betrachtet man die Curve in Fig. 47, so stellt die Grösse der punktirten Linien den Betrag der Induction dar; die gesammte Wirkung erhält man durch Summirung der Längen aller der Linien von 0 bis 180 Grad; diese Summe ist ebenso gross als die Summe der negativen Längen zwischen 180 und 360 Grad. Wir müssen aber noch einen andern Weg einschlagen, der uns

ausser dem Endergebnisse erkennen lässt, wie die Summe durch Hinzufügung jeder Länge nach und nach wächst. Wir werden dann finden, dass die Summe zuerst langsam, dann schnell und dann wieder langsam wächst, wenn sie sich ihrem höchsten Werthe nähert. Die Summe der Wirkungen würde in der That in der Weise wachsen, wie solches in Fig. 49 in kleinerem Maassstabe dargestellt ist.

Die Summirung einer Reihe von stetig veränderlichen Grössen wird in der Mathematik mit dem Namen »Integration« bezeichnet. Die Fig. 49 wird durch Integration der Werthe in der Curve der Fig. 47 zwischen den Grenzen 0 und 180 Grad erhalten. In der Dynamomaschine wird die Integration durch die Natur des Vorganges selbst bewirkt, weil jede Abtheilung mit ihren beiden Nachbarn in Verbindung steht.

Durch einen Versuch kann man beide Wirkungen erforschen¹⁾: die Induction in den einzelnen Wickelungen und die gesammte, integrierte Spannung.

Verschiedene Methoden sind zur Messung der elektromotorischen Kräfte angegeben worden.

Methode der Hilfsbürsten. Die in einer einzelnen Abtheilung inducirte elektromotorische Kraft kann bei irgend einer besonderen Lage der Abtheilung mittels eines Spannungsmessers auf folgende Art geprüft werden: Zwei kleine Metallbürsten werden auf einem Holzstücke befestigt, und zwar in einer Entfernung von einander, die der Weite zweier aufeinander folgender Theile des Stromabgebers entspricht. Die Bürsten werden durch Drähte mit den Klemmen des Spannungsmessers verbunden. Die beiden Bürsten werden gegen den Stromabgeber gehalten, während er sich dreht, wie die Fig. 50 zeigt; da sie an jedem beliebigen Punkte des Umfanges angebracht werden können, so zeigt der Spannungsmesser die Grösse

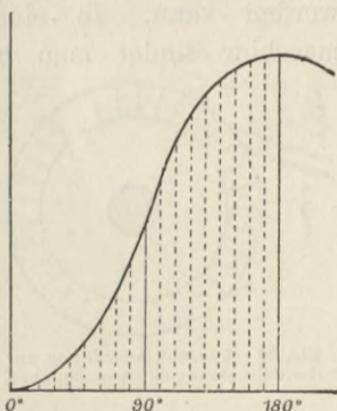


Fig. 49. Curve des integrierten Potentials.

1) Es möge hiermit auf die vom Verfasser 1883 vor der Society of Arts gehaltenen Cantor Lectures verwiesen werden, ferner auf die von Gaugain gewonnenen Inductionscurven (vergl. Ann. de Chimie et de Physique), ebenso auf die Untersuchungen von Isenbeck (Elektrot. Ztschr., August 1883). Die neuen Untersuchungen an Wechselstrommaschinen von Ryan, Fleming und Anderen werden später eingehend berücksichtigt werden.

der elektromotorischen Kraft in derjenigen Abtheilung des Ankers an, welche durch die der Lage der Bürsten entsprechende Stelle des Feldes hindurchgeht.

Mordey's Methode. Das Ansteigen des gesammten (d. h. des integrierten) Potentials um den Anker herum kann durch einen Versuch nach einer zuerst von Mordey angegebenen Methode ebenfalls unter Verwendung einer Hilfsbürste und eines Spannungsmessers ermittelt werden.

Eine Klemme des Spannungsmessers wird mit einer der Bürsten *A* verbunden (Fig. 51); von der anderen Klemme führt ein Draht zu einer kleinen Metallbürste *p*, die gegen den sich drehenden Stromabgeber an jedem beliebigen Theile seines Umfanges angedrückt werden kann. In einer zweckmässig angeordneten Gleichstrommaschine findet man bei Messung der Spannung zwischen der

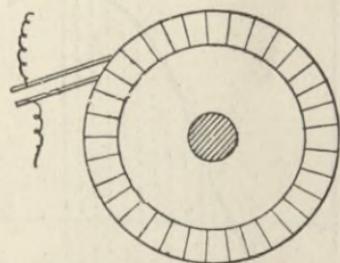


Fig. 50. Versuchsanordnung zur Potentialmessung am Stromabgeber.

negativen Bürste und den folgenden Stäben des Stromabgebers, dass das Potential regelmässig nach beiden Seiten auf dem Wege um den Stromabgeber steigt, und auf der entgegengesetzten Seite bei der positiven Bürste am grössten wird.

Die Vertheilung bei schlecht gebauten Maschinen ist unregelmässig.

Swinburne's Methode. Eine vortreffliche Abänderung der vorgenannten Methode wird durch Einschaltung eines hohen Widerstandes zwischen den Klemmen der Maschine gewonnen. Mittels eines Galvanometers findet man diejenigen Stellen des den Widerstand bildenden Drahtes, die dasselbe Potential wie das der verschiebbaren Bürste besitzen. Da die Methode eine Nullmethode ist, so liefert sie genaue Ergebnisse; es bedarf ferner nicht der Anwendung des Spannungsmessers, der für die vorher beschriebene Methode in weitem Bereiche genau sein muss.

Joubert's Methode. Eine andere Art zur Bestimmung der in jedem Punkte bei dem Umlauf inducirten elektromotorischen Kraft ist von Joubert¹⁾ angegeben worden. Er setzte auf die Achse der Dynamomaschine ein Paar isolirter Metallringe, mit denen die Enden der Ankerwicklung verbunden wurden. Jeder Ring besass ein vorspringendes Contactstück, das bei jeder Umdrehung der Achse einen Augenblick eine Feder berührte. Der Zeitpunkt, zu dem die

1) Ann. de l'Ecole Normale, Bd 10, S. 131. 1881.

Berührung stattfindet, hängt von der Stellung der Berührungsfedern ab; sie konnten an verschiedenen Punkten eingestellt werden, und so vermochte man die Werthe der elektromotorischen Kräfte in allen verschiedenen Lagen des Ankers zu bestimmen. Die Methode von Joubert wurde mit einigen Abänderungen von Mordey und Raworth¹⁾, sowie von Ryan²⁾ und Fleming³⁾ benutzt.

Mordey's statische Methode. Eine andere Methode, die bei stillstehenden Maschinen mit stromlosem Anker anwendbar ist, besteht darin, dass die Feldmagnete besonders erregt werden, während die Ankerwickelungen, oder eine derselben, mit einem passenden ballistischen Galvanometer (Galvanometer mit grosser Schwingungsdauer der Nadel) verbunden werden. Man beobachtet dann den

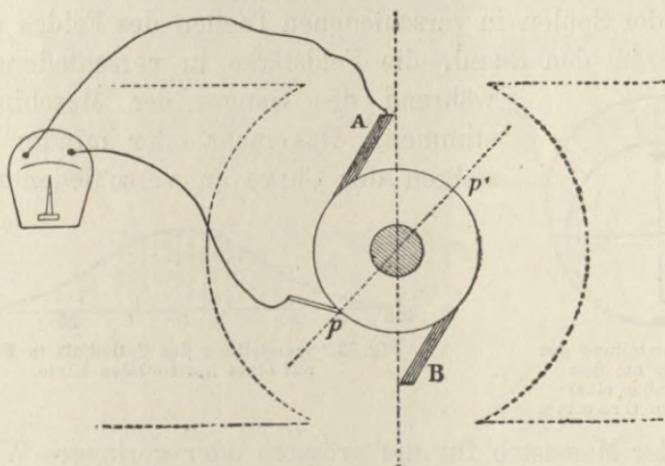


Fig. 51. Mordey's Versuchsanordnung zur Potentialmessung am Stromabgeber.

Ausschlag, der infolge der plötzlichen Unterbrechung des Stromes in dem Erregerkreise entsteht. Wird diese Beobachtung für eine Anzahl von Stellungen des Ankers zu dem Feldmagnet angestellt, so erhält man ein Maass für die Stärke der magnetischen Strömung, die der jedesmaligen Lage des Ankers entspricht. Die als Curve dargestellten Ergebnisse zeigen die Vertheilung des Magnetismus im Felde. Die Vertheilung wird aber, wie wir sehen werden, durch den Strom im Anker gestört, sobald die Maschine in Betrieb gesetzt worden ist.

Die Ablesungen können um einen den Umfang des Stromabgebers darstellenden Kreis aufgezeichnet werden. Die Fig. 52 und 53, die

1) Journ. Inst. Electric. Engin., Bd. 18, S. 670. 1889.

2) Trans. Amer. Inst. Electr. Engin., Bd. 7, S. 3. 1890.

3) Electrician, 22. Febr. 1895.

den Vorlesungen des Verfassers entstammen, sollen zeigen, wie das Potential in einer guten Gramme'schen Maschine vom niedrigsten bis zu seinem höchsten Werthe allmählich steigt.

Wie man sieht, steigt das Potential ganz regelmässig von der im tiefsten Punkte befindlichen negativen Bürste bis zu einem Maximum an der positiven Bürste. Die in der Fig. 52 um den Kreis gezeichneten Werthe sind als Ordinaten in Fig. 53 aufgetragen; dieselbe stellt eine an einer Gramme'schen »A«-Maschine bewirkte Aufnahme dar. Derartige, von Messungen der Potentialvertheilung am Stromabgeber gewonnene Curven zeigen nicht nur, wie zur Erlangung der besten Wirkung die Bürsten zu stellen sind, sondern belehren uns auch über die verhältnissmässige Unthätigkeit oder Thätigkeit der Spulen in verschiedenen Theilen des Feldes und setzen uns ferner in den Stand, die Feldstärke in verschiedenen Theilen während des Ganges der Maschine zu bestimmen. Das mehr oder minder steile Ansteigen der Curve an verschiedenen Punkten

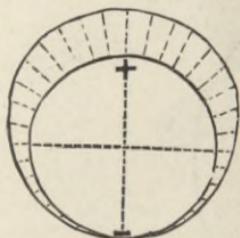


Fig. 52. Darstellung des Potentials um den Stromabgeber einer Maschine von Gramme.

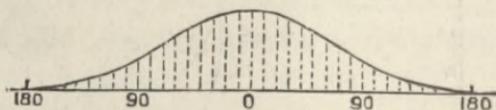


Fig. 53. Darstellung des Potentials in Fig. 52 auf einer horizontalen Linie.

ist selbst der Maassstab für die grössere oder geringere Wirksamkeit der Spulen in den zugehörigen Theilen des Feldes.

Das Ansteigen des Potentials ist zwischen je einem Paar Stäben des Stromabgebers nicht gleich, denn sonst würde die Curve nur aus zwei schrägen geraden Linien bestehen, die rechts und links von dem Punkte des höchsten bzw. niedrigsten Potentials ansteigen. Im Gegentheile ist zwischen denjenigen Stäben des Stromabgebers, die zu den in der Zone des schwachen magnetischen Feldes liegenden Spulen gehören, nur ein geringer Unterschied des Potentials, ein grosser dagegen dort, wo die Curve am steilsten ist, in einer Lage von nahezu 90 Grad von den Bürsten, also an dem Theile des Stromabgeberumfangs, der in Verbindung mit den die wirksamste Lage durchlaufenden Spulen steht. Wenn das magnetische Feld, in dem der Anker sich dreht, gleichförmig und parallel wäre, so würde die Curve eine wirkliche Sinuscurve sein. Die Zahl der durch eine Spule tretenden Kraftlinien würde proportional dem Cosinus des Winkels sein, den die Senkrechte zur Ebene der Spule mit der

resultirenden Richtung der Kraftlinien im Felde bildet, und die Zahl der in der Zeiteinheit geschnittenen Kraftlinien müsste dem Sinus dieses Winkels proportional sein.

Der Cosinus wird aber ein Maximum, wenn der Winkel = 0 Grad ist; sobald demnach die Spule parallel zu den Kraftlinien steht, d. h. 90 Grad von den Bürsten, wird der Zuwachs des Potentials am grössten, wie dies auch beinahe in der Fig. 53 zutrifft. Die Curve ist hier eine fast genaue Sinuscurve.

Aber bei gewöhnlichen Dynamomaschinen mit Poloberflächen, die den Anker auf beiden Seiten dicht umschliessen, wie in Fig. 46, hat das Feld — wenigstens wenn es nicht durch Anker-Rückwirkung verzerrt ist — in dem Zwischenraum nahezu strahlenförmige Anordnung. In dem zwischen den Polecken liegenden Raume treffen fast gar keine Kraftlinien den Anker; daher werden die umlaufenden Spulen wirksam, sobald sie in den Zwischenraum eintreten, bleiben nahezu gleichmässig, so lange sie sich in demselben befinden, und werden fast wirkungslos, sobald sie aus demselben und zwischen die Polecken kommen. In solchem Falle wird die Untersuchung der Potentiale nach der ersten Methode das Diagramm A der Fig. 54 ergeben. Das Diagramm des Gesamt-Potentials, nach der zweiten Methode aufgenommen, wird durch B derselben Figur dargestellt.

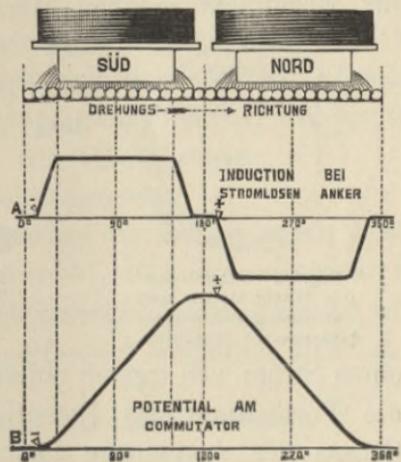


Fig. 54 Darstellung des Potentials am Commutator bei stromlosem Anker.

Wenn die Bürsten unzweckmässig gestellt, oder wenn die Polansätze nicht richtig geformt sind, wird das Ansteigen des Potentials unregelmässig; die Maxima und Minima des Potentials treten dann an anderen Punkten auf. Ein Diagramm, welches von einer in dieser Beziehung fehlerhaft angeordneten Maschine entnommen wurde, ist aus der Fig. 55 ersichtlich und in der Fig. 56 auf eine wagerechte Achse gezeichnet. Es ist hieraus nicht nur zu ersehen, dass das Ansteigen des Potentials unregelmässig wurde, sondern auch, dass der eine Theil des Stromabgebers in höherem Grade positiv als die positive Bürste selbst, und ein anderer Theil in höherem Grade negativ als die negative Bürste war. An den Bürsten herrschte deshalb nicht die zu erwartende Potentialdifferenz; in einem Theile

der Wicklungen wurden die Ströme thatsächlich gegen eine entgegenwirkende elektromotorische Kraft getrieben.

Wie wir sehen werden, wirkt der Strom im Anker auf das magnetische Feld zurück und stört die Vertheilung der Kraftlinien im Zwischenraume. Die beschriebene Methode zur Untersuchung der Vertheilung des Potentials um den Stromabgeber hat sich als sehr nützlich für die Praxis erwiesen, denn sie klärt verschiedene verwickelte und unregelmässige Ergebnisse auf, die man vorher nicht zu deuten vermochte.

Aehnliche Curven, wie die erläuterten, können von dem Stromabgeber irgend einer Gleichstrommaschine mit geschlossener Ankerwicklung entnommen werden. Die Maschinen mit offener Wicklung für Bogenlicht ergeben Darstellungen von ganz verschiedener Art mit Rücksicht auf die besondere Anordnung ihrer Stromabgeber. Zu beachten bleibt auch, dass das Vorhandensein von Bürsten, die

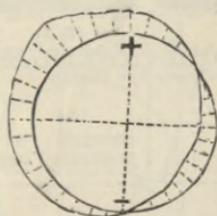


Fig. 55. Darstellung des Potentials um den Stromabgeber einer fehlerhaften Maschine.

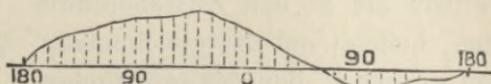


Fig. 56. Darstellung des Potentials in Fig. 55 auf einer wagrechten Linie.

einen Strom von irgend einem Punkte des Stromabgebers entnehmen, die Vertheilung des Potentials an letzterem ändert; die Art und Grösse der Aenderung hängt von der Stellung der Bürsten, der Menge des entnommenen Stromes und der Bauart der Maschine ab.

Curven, aus denen man die durch Gegenwirkung des Ankers herrührenden Verzerrungen ersehen kann, haben Gaisberg¹⁾ für eine Maschine von Schuckert, Kohlrausch²⁾ für eine Maschine von Lahmeyer und M. E. Thompson³⁾ für eine Maschine von Thomson-Houston geliefert; auch Ryan hat auf diesem Gebiete gearbeitet (siehe oben).

Gegenwirkungen der Ströme im Anker.

Während des Ganges einer Dynamomaschine tritt eine Reihe gänzlich neuer Erscheinungen auf, und zwar infolge der magnetischen und elektrischen Wechselwirkungen zwischen Anker und Feldmagnet

1) Elektrot. Ztschr., Bd. 7, S. 67. Febr. 1886.

2) Centralbl. f. Elektrot., Bd. 9, S. 419. 1887.

3) Electrical World, Bd. 17, S. 392. 1891.

und zwischen den einzelnen Abtheilungen der Ankerwicklung. Der im Anker kreisende Strom bringt magnetisirende Wirkungen hervor, die mit den Wirkungen der erregenden Ströme des Feldmagnetes zusammentreffen. Es können auch in den Metallmassen Wirbelströme hinzutreten, die das magnetische Feld stören. Diese Gegenwirkungen des umlaufenden Ankers offenbaren sich in verschiedener Weise.

Die wichtigeren Wirkungen sind folgende:

1. Bestreben, den Anker quer zu den Kraftlinien des Feldes zu magnetisiren;
2. Neigung zur Funkenbildung an den Bürsten;

Daher entsteht die Nothwendigkeit, die Bürsten um einen gewissen Winkel bis zu einem Punkte zu verschieben, an dem die Funkenbildung aufhört.

3. Die Neigung des Ankerstromes, zu entmagnetisiren;
4. Aenderungen der Funkenbildung und der neutralen Punkte, wenn der Strom, den die Maschine abzugeben hat, sich ändert;
5. Erhitzung der Ankerkerne und der Wickelungen;
6. Erhitzung der Polstücke des Feldmagnetes;
7. Verschiedenheit zwischen dem Betrage der mechanischen Arbeit, die an der Achse aufgewendet wird, und dem Betrage der elektrischen Arbeit, die in dem elektrischen Kreise geleistet wird.

Die Art dieser Gegenwirkungen erfordert sorgfältige Beachtung.

Quermagnetisirende Wirkung des Ankerstromes.

Wir sahen (S. 39 und 60 und Fig. 48), dass ein Anker mit geschlossener Wickelung in seiner Wirkung wie eine Doppelbatterie, und die zwei Spulensätze wie zwei Reihen parallel geschalteter Elemente betrachtet werden können. Wir wollen nun zeigen, dass ein Ringanker auch als ein Doppelmagnet anzusehen ist.

Es sei ein eiserner Halbring (Fig. 57) von einer stromführenden Wickelung umgeben. Dann wird der Ring ein Magnet, mit einem Nordpole am einen, mit einem Südpole am anderen Ende. Wird ein vollständiger Ring ähnlich, aber mit einer endlosen Wickelung umgeben und wird nun Strom aus einer Batterie oder einer anderen Stromquelle einem Punkte zugeführt, so dass der Strom die beiden Hälften bis zu einem Punkte an der entgegengesetzten Seite durchläuft und von dort aus in einen Leiter weiterfließt, so wird jede Ringhälfte magnetisirt. Wenn der Strom in der Richtung der Pfeile in Fig. 58 kreist, wird ein doppelter Südpol an dem Eintrittspunkte und ein doppelter Nordpol am Austrittspunkte des Stromes entstehen.

Die einen Gramme'schen Ring umfliessenden Ströme werden also den Ring in der beschriebenen Weise zu magnetisiren suchen.

Betrachten wir die Vertheilung der Magnetisirung im Ringe selbst. Fig. 59 zeigt im Allgemeinen den Verlauf der magnetischen Kraftlinien im Eisen; wo sie in die Luft treten, befinden sich die wirklichen Pole des als Magnet betrachteten Ringes. Man vergleiche nun genau die Fig. 59 und 65; obgleich die Mehrzahl der Kraftlinien nach aussen am Umfange des Ringes in die Luft übertritt,

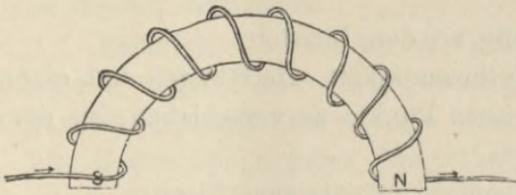


Fig. 57. Pole eines Halbringes.

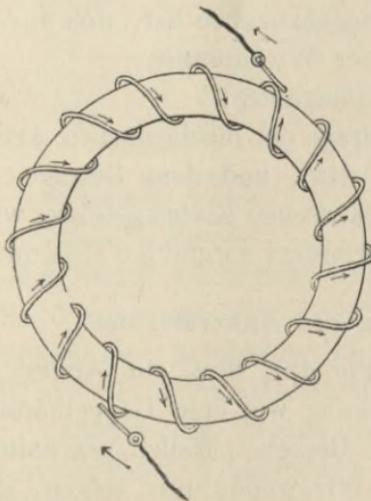


Fig. 58 Stromverlauf um einen Ringanker.

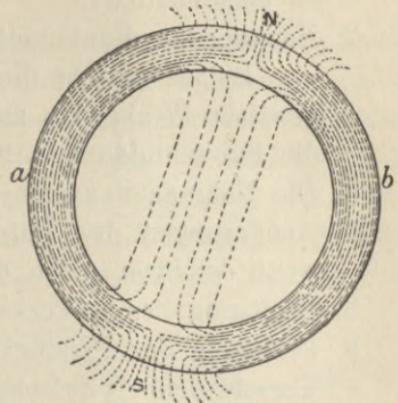


Fig. 59. Magnetisches Feld des Ankerstromes.

so nehmen doch einige Kraftlinien ihren Weg durch den inneren Raum vom Nord- zum Südpole. Dieser Theil des magnetischen Feldes würde in einer Dynamomaschine schädlich wirken, wenn die Zahl seiner Kraftlinien nicht gering wäre. Die Gegenwart der äusseren Eisenmassen an den polaren Theilen des Feldmagnetes veranlasst die magnetischen Linien, ihren Weg nach aussen zu nehmen.

Es ist klar, dass die Quermagnetisirung eine Verzerrung des magnetischen Feldes in den Polstücken und in dem Zwischenraume hervorbringen wird; falls die Bürsten genau an den Endpunkten eines zu den beiden Polen des Feldmagnetes symmetrisch liegenden Durchmessers bleiben könnten, so würde die Wirkung des Querfeldes auf die elektromotorische Kraft der Maschine unmerklich sein. Die Bürsten müssen aber, um die Funkenbildung zu vermeiden, um einen Winkel verschoben werden; der Durchmesser der Stromwendung

liegt schräg, wenn die Bürsten sich an den neutralen Punkten befinden. Ist dies aber der Fall, so wirkt der Strom des Ankers, wie wir sehen werden, nicht nur quermagnetisierend, sondern auch entmagnetisierend; hierdurch wird die elektromotorische Kraft aber geschwächt.

Fig. 60 stellt die magnetische Strömung durch den ruhenden Anker hindurch dar, falls die Feldmagnete besonders erregt werden. Die Breite des Zwischenraumes erscheint vergrössert, die Drahtleiter sind sowohl auf dem Anker als auf dem Feldmagnete im Schnitte gezeichnet, als wenn sie aus einer einzelnen Lage starker runder Drähte beständen. Leiter, in denen ein Strom gegen den Beobachter zu fließt, sind durch einen Mittelpunkt gekennzeichnet; Leiter, in denen der Strom von dem Beobachter fort fließt, sind durchkreuzt.

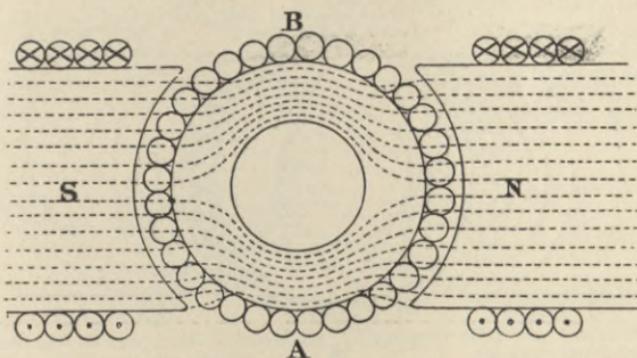


Fig. 60. Magnetische Strömung durch den stromlosen Anker.

Der Leser mag annehmen, dass der Punkt die Spitze eines Pfeiles sei, der gegen ihn gerichtet ist, während das Kreuz die Fiederung am Pfeilende bedeutet. Stromlose Leiter sind weiss gelassen.

Man sieht, dass die magnetischen Linien recht gleichförmig vertheilt sind, und zwar sowohl in den Zwischenräumen als in den Poltheilen des Feldmagnetes. Der Anker besitzt eine Trommelwicklung, die Drähte liegen nur an der Aussenseite. Die magnetisierende Wirkung eines Stromes wird ebenso wie diejenige sein, die vorhin bei einem Anker mit Ringwicklung gezeigt wurde, obgleich sie weniger stark ist.

Es möge der Strom in der Wicklung des Feldmagnetes unterbrochen, dagegen ein Strom lediglich durch die Ankerwicklung geleitet werden, um die Wirkung des beim Betriebe der Maschine erzeugten Stromes darzustellen. — Sind nun die Verbindungen derartig, dass die Wicklung als rechtsgängige wirkt, läuft die Maschine ferner rechts herum, so steigen die Ströme in beiden

Wickelungssätzen nach oben zu, und da die obere Bürste die positive ist, wird der bei *B* erzeugte Doppelpol ein Nordpol sein. Nimmt man an, dass die Bürsten, durch die der Strom ein- und austritt, an den höchsten und niedrigsten Punkten, wie die Fig. 61 darstellt, liegen, so können die punktierten Linien angesehen werden als Darstellung der magnetischen Linien, welche von dem durch die Ankerwicklung geleiteten Strome erzeugt werden. Da die Zahl der magnetischen Linien von der Güte des Weges, den sie zu durchlaufen haben, abhängt, so ist klar, dass das querliegende Feld, welches von einem in einer gegebenen Zahl von Leitern fliessenden Strome erzeugt wird, um so grösser sein muss, je enger der Zwischenraum ist, und je ausgedehnter der Bogen ist, der durch

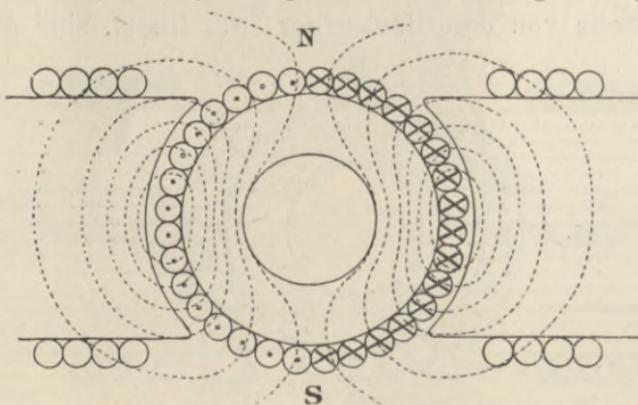


Fig. 61. - Quermagnetisierende Wirkung des Ankerstromes.

die Polmassen des Eisens¹⁾ auf jeder Seite gebildet wird. Es ist dabei zu beachten, dass die Kraftlinien den Zwischenraum auf jeder Seite des Ankers zweimal kreuzen müssen.

Sobald in der Dynamomaschine ein Strom erzeugt wird, treten beide magnetisierende Thätigkeiten gleichzeitig auf. Ein annäherndes Bild der Sachlage erhalten wir aus der Fig. 62.

Wir nahmen zunächst an, dass die Bürsten zwei Punkte des senkrechten Durchmessers berühren. Die Feldmagnete streben den Ring so zu magnetisieren, dass der zu äusserst liegende linke Punkt ein Nordpol wird, die Ankerströme in der Weise, dass der höchste Punkt, wo die Bürste liegt, ein Nordpol wird. Die Folge davon ist eine resultierende Magnetisierung in schräger Richtung.

Der Magnetismus wird so in der Richtung des Umlaufes verschoben (bei Triebmaschinen in der entgegengesetzten Richtung), als

1) Vergl. Journ. Inst. Electric. Engin., Bd. 20. 1891.

wenn der Umlauf des Ankers thatsächlich den Magnetismus etwas herübergezogen hätte. Die Stelle des höchsten Potentials wird demnach etwas nach der Drehungsrichtung zu verschoben werden. Aus den vorhin gegebenen Gründen darf nun aber der Durchmesser, an dessen Enden die Bürsten sich befinden, nicht symmetrisch zu den Polshuhen liegen, sondern muss um einen kleinen Winkel in der Richtung der Bewegung nach vorwärts verschoben werden. Daher liegt auch das Querfeld schräg und sucht eine weitere Verzerrung herbeizuführen.

Zieht man die Linie OF (Fig. 63) als Darstellung der erregenden Ampère-Windungen des Feldmagnetes, und die Linie OB als Darstellung der Grösse und Richtung der erregenden Ampère-Windungen des Ankers, so wird

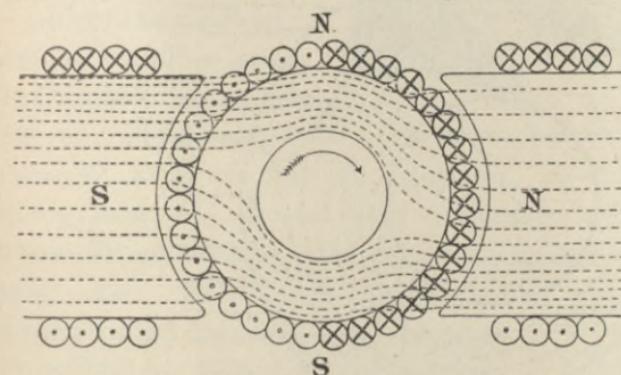


Fig. 62. Vereinigte Wirkung des Stromes im Feldmagnet und im Anker.

die Diagonale OR die Grösse und Richtung der resultirenden magnetisirenden Kraft geben.

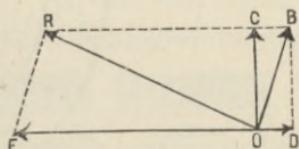


Fig. 63. Magnetisirende Kräfte im Feld der Dynamomaschine.

Ein übertriebenes Bild der Verschiebungen der Kraftlinien bei einer Maschine mit Ringwicklung giebt Fig. 64.

Eine Betrachtung der Fig. 60 und 62 zeigt aber auch, dass der Magnetismus des Ankers auf den Magnetismus der Polstücke zurückwirkt. Die Kraftlinien werden in dem Eisen des linksseitigen Polstückes gegen die obere Ecke aufwärts und im rechts liegenden Polstück gegen den unteren Theil gedrängt, als wenn die Polarität nach einer Seite aufwärts und nach der anderen Seite abwärts gerichtet wäre. Auch die Dichtigkeit des Feldes ist gänzlich gegen die in Fig. 60 dargestellte verändert. Die Kraftlinien an der oberen linken Seite sind zusammengedrängt. Der resultirende Nordpol des Ringes — mit nnn bezeichnet, von dem aus die Kraftlinien vom Ringe austreten — zieht den Südpol — mit sss bezeichnet, von dem aus die Linien in den Feldmagnet eintreten — an, und die treibende Dampfmaschine muss stark arbeiten, um den Anker gegen diese Anziehungen herum zu drehen. Je stärker der Strom im

Anker wird, desto kräftiger werden die Pole im Anker, desto stärker wird die Anziehung von nnn gegen sss , und um so stärker muss die Maschine arbeiten, um ihre Geschwindigkeit zu erhalten.

In Betreff der Figur, die sich auf eine Ringmaschine bezieht, muss noch bemerkt werden, dass einige von den Kraftlinien, die vom Ankerstrome herrühren — zwei von denselben sind in der Figur punktirt — quer durch den Innenraum laufen und zum äusseren Felde nichts beitragen. Die schräge Richtung dieses inneren Feldes bezeichnet den Winkel der Bürstenverschiebung. Hervorzuheben ist, dass die innersten Lagen des Eisens im Ringe anders als die

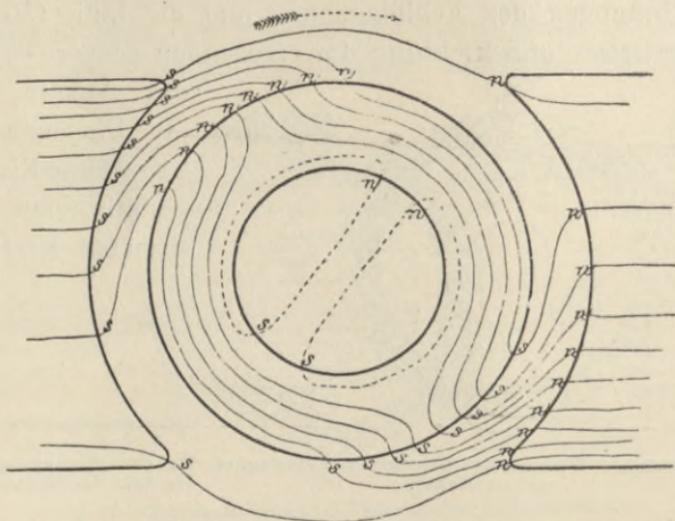


Fig. 64. Magnetische Wechselwirkungen zwischen Feldmagnet und Anker eines Stromerzeugers.

Aussenlagen magnetisirt werden, denn der N -Pol der äusseren Eisenlagen nimmt schräg nach links Stellung, während der Nordpol der inneren Lagen rechts von dem höchsten Punkte liegt.

Alle diese Erscheinungen — die Verschiebung des Feldes — dessen Verstärkung an der Austrittskante eines Polschubes (wo die Ankerwindungen unter dem Pol austreten) — dessen Schwächung an der Eintrittskante — das schwache innere Feld — der Unterschied zwischen der Lage der inducirten Pole an den inneren und äusseren Seiten des Ringes, können sämmtlich bei einer in Bewegung befindlichen Maschine beobachtet werden. Fig. 65 zeigt die Gruppierung von Eisenfeilspänen bei einem Versuche, bei welchem ein magnetischer Ring mit den Polen ns zwischen die Pole NS eines Feldmagnetes gebracht wurde, der in dem Ringe die Pole $n's'$ zu induciren suchte. Der Verlauf der Kraftlinien ist hieraus

klar zu ersehen. Man mag dieses Bild mit den Fig. 62 und 64 vergleichen.

Bei Trommelankern sind die Erscheinungen, wenn sie auch in derselben Art auftreten, weniger deutlich zu erkennen. Infolge der Ueberwicklung der Windungen an der Aussenseite des Ankers werden die Ströme in einigen Windungen in ihrer magnetisirenden Wirkung auf den Kern theilweise durch diejenigen neutralisirt, welche querüber laufen, und deshalb ist die dem Strome entsprechende

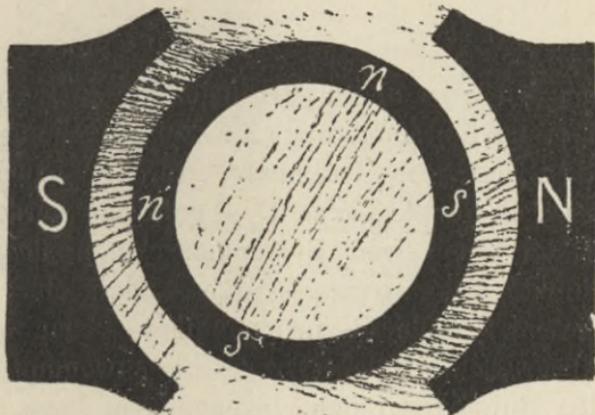


Fig. 65. Feld einer zweipoligen Maschine.

Polarität nicht so klar zu erkennen, als bei Ringankern. Ebenso wenig kann ein inneres Feld vorhanden sein. In der That unterliegen Trommelanker weniger als Ringanker den Inductionsstörungen jeder Art. Mit diesen Ausnahmen jedoch treffen dieselben Betrachtungen zu, welche wir vorhin angestellt haben.

Ein Blick auf Fig. 61 zeigt, dass die von der Ankerwicklung herführenden Kraftlinien zweimal auf jeder Seite den Luftzwischenraum kreuzen, einmal in derselben Richtung wie die Kraftlinien des Hauptfeldes, das zweite Mal aber in entgegengesetzter Richtung; deshalb muss unvermeidlich eine Schwächung des Hauptfeldes in denjenigen Theilen des Zwischenraumes eintreten, wo die Kraftlinien gegeneinander wirken, eine Verstärkung des Feldes aber, wo sie gleiche Richtung haben; gleichsam als wenn die sich drehenden Kupferleiter die Kraftlinien beim Durchgange mit sich forttrissen.

Die Verzerrung der Kraftlinien hat natürlich eine ähnliche Verzerrung der Inductionscurven zur Folge. Wenn man mit der Hilfsbürste und dem Spannungsmesser untersucht, erhält man

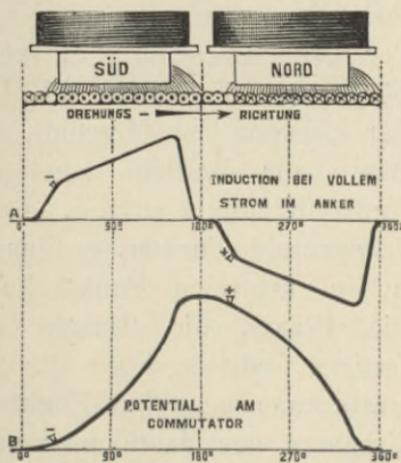


Fig. 66. Darstellung des Potentials am Commutator bei stromführendem Anker.

Curven, welche von den bei stromlosem Anker erhaltenen abweichen. Fig. 66 zeigt die Form der Inductionscurven bei Vorhandensein von Ankerströmen und ist zu vergleichen mit der in Fig. 54 dargestellten Curve bei stromlosem Anker.

Neutrale Punkte.

Seit der ersten Benutzung der Dynamomaschinen fand man, dass zur Verminderung der Funkengebung auf das geringste Maass die Bürsten in bestimmte, durch Versuche gefundene Lagen — neutrale Punkte genannt — gebracht werden müssten. In gewöhnlichen zweipoligen Dynamomaschinen liegen die beiden neutralen Punkte an entgegengesetzten Enden eines Durchmessers, der aus diesem Grunde die neutrale Linie genannt wird. Daneben soll der Ausdruck »Durchmesser der Stromwendung« ausschliesslich die von den Bürsten wirklich eingenommene Lage bezeichnen oder die Lage der Wickelungen, die an den Bürsten vorbeigehen, mögen letztere am neutralen Punkte liegen oder nicht. Die Erfahrung zeigt, dass fast in allen Fällen die neutrale Linie nicht genau rechtwinkelig zu der die Mitte der Polstücke verbindenden Linie läuft, sondern (bei einem Stromerzeuger) schräg herüber um einige Grade nach der Drehungsrichtung zu verschoben ist. Früh fand man, dass bei vielen Maschinen die Lage des neutralen Punktes sich mit der Leistung der Maschine änderte. Wenn die Bürsten so lagen, dass beim Betriebe einer bestimmten Zahl von Lampen keine Funkenbildung stattfand, so gab die Maschine bei Aenderung der Lampenzahl Funken, so lange die Bürsten nicht wieder auf die neuen neutralen Punkte eingestellt wurden. Daraus entsprang die Praxis, die Bürsten an Hebeln oder »Rückern« zu befestigen, mittels deren die Berührungsstellen vorwärts und rückwärts zum neutralen Punkte verlegt werden konnten. Von den Erbauern der Maschinen wurde der praktischen Aufgabe, wie man die Veränderungen des Verschiebungswinkels ausgleichen könne, grosse Beachtung geschenkt.

Funkenbildung am Stromabgeber.

Wenn eine Dynamomaschine oder ein Elektromotor fehlerhaft entworfen oder ausgeführt ist, besonders wenn ein zu starker Strom durch den Anker geht, entstehen am Stromabgeber an den Spitzen der Bürsten glänzende Funken von blauer oder grüner Farbe. Die letztere Färbung rührt her von der Verflüchtigung sehr kleiner

Kupfertheilchen. Starke Funkenbildung zerstört den Stromabgeber in sehr kurzer Zeit und muss durchaus vermieden werden. Wenn ein neuer oder neu abgedrehter Stromabgeber Funken giebt, so wird eine Untersuchung zeigen, dass die Ränder vieler oder aller Segmente wie verbrannt aussehen. Diese Erscheinung zeigt sich — gleichgültig, ob wir es mit einer Dynamomaschine oder mit einem Motor zu thun haben — nur an denjenigen Segmentkanten, welche zuletzt mit den Bürsten in Berührung waren; die in der Richtung der Drehung vorderen Kanten zeigen keine Spur von Verbrennung. Dieser Umstand beweist, dass der schädliche Funke gerade in dem Augenblicke entsteht, wenn das unter der Bürste hinweggleitende Segment ausser Contact mit ihr kommt. Die Ursache der Funkenbildung ist die folgende: In allen Ankerleitern wechselt der Strom bei jeder Umdrehung mehrfach seine Richtung, bei zweipoligen Maschinen zweimal, bei mehrpoligen mehr als zweimal. — In dem in Fig. 62 dargestellten Falle fliesst der Strom in allen auf der linken Seite aufsteigenden Ankerleitern auf den Beschauer zu, er fliesst von demselben weg in den Drähten, welche auf der rechten Seite sich abwärts bewegen. Ein Richtungswechsel findet jedesmal statt, wenn der Leiter oder das mit ihm verbundene Segment unter einer Bürste vorbeigeht. Das Entstehen oder Nichtentstehen von Funken hängt nun von den Umständen ab, unter welchen der Stromrichtungswechsel stattfindet, und ist eine Folge der Selbstinduction, einer Eigenschaft, welche davon herrührt, dass jeder stromführende Leiter ein eigenes magnetisches Feld um sich verbreitet, und in Folge deren es unmöglich ist, plötzlich einen Strom in voller Stärke in Gang zu setzen, ihn anzuhalten oder umzukehren.

Betrachten wir eine aus mehreren Theilen zusammengesetzte Ringwicklung. Jeder Theil bestehe aus einer oder zwei Leiterwindungen. Der Strom wechselt seine Richtung in den einzelnen Theilen nacheinander, sowie sie an die neutralen Punkte gelangen. Die eine Hälfte des Stromes fliesst aufwärts in die Wickelungen der linken Ringhälfte und die andere Hälfte des Stromes aufwärts in die Wickelungen der rechten Ringhälfte. Wenn die positive Bürste nahe dem obersten Theile steht (Fig. 67), so fliesst der Strom von links nach rechts durch die Abtheilungen *X* und *W* links von der Bürste und von rechts nach links durch die Abtheilungen *T* und *U* zur Rechten der Bürste. Dreht sich der Anker, so gelangen die Stäbe des Stromabgebers nacheinander in Berührung mit der Bürste. In der Fig. 67 sind die Stäbe *c* und *d* bereits unter der Bürste

weggegangen, der Stab *e* verlässt eben die Bürste und *f* beginnt an ihr vorbeizugehen. Für eine kurze Zeit liegt die Bürste an beiden benachbarten Stäben *e* und *f*, die Abtheilung *V* wird deshalb einen Augenblick kurz geschlossen.

Die Dauer des Kurzschlusses hängt offenbar von der Geschwindigkeit des Umlaufes ab, sowie von der Breite des isolirenden Zwischenraumes zwischen den Stäben des Stromabgebers und von der Breite der Berührungsfläche der Bürste. Die Abtheilung *V* gehörte vorher einen Augenblick zur linken Ringhälfte; ist sie aber unter der

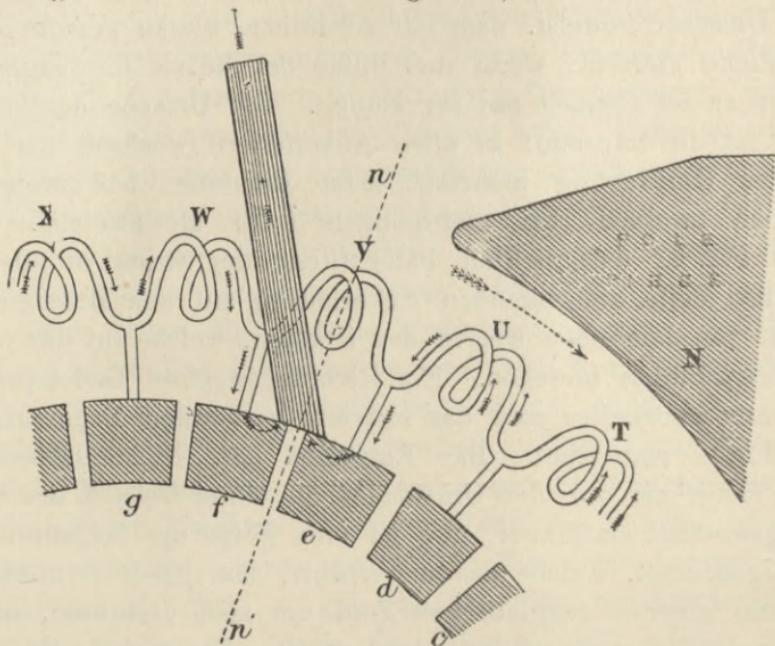


Fig. 67. Vorgang der Stromwendung in einer Ankerabtheilung.

Bürste weggegangen, d. h. hört *e* auf, die Bürste zu berühren, so gehört *V* zur rechten Ringhälfte. Es ist klar, dass während des Vorbeigehens an der Bürste der in der Abtheilung *V* kreisende Strom anhält und danach wieder in entgegengesetzter Richtung durch die Wicklung zu fließen beginnt. Jede Abtheilung des Ankers tritt bei ihrem Vorbeigehen an der Bürste aus der einen Ringhälfte zur anderen über, der Strom in der Abtheilung kehrt sich um. Dies ist der Vorgang der Stromwendung. Nehmen wir die Anordnung so an, dass die Stromwendung genau an demselben Punkte erfolgen würde, an dem die Wicklungen keine magnetischen Linien schneiden, so dass demnach während des Kurzschlusses der Wicklung diese nicht den Sitz einer inducirten elektromotorischen Kraft bildet. Der Strom in der Wicklung verschwindet dann ganz; wenn sie

unter der Bürste hervorkommt, so gelangt sie als vollständig unthätige Wickelung zur rechten Ringhälfte, in der ein Strom gegen die Bürste zu fließt. Ehe der Stab e sich von der Bürste trennt, gelangt der durch T und U kommende Strom über e zur Bürste; sowie sich e fortbewegt hat, muss der Strom plötzlich seinen Weg durch die Wickelungen V nehmen. Der Strom vermag indessen wegen der Selbstinduction in der unthätigen Wickelung V nicht augenblicklich zu voller Stärke anzusteigen; ehe deshalb V wirklich in Thätigkeit gelangt, geht der Strom unter Funkenbildung zwischen e und der Bürste über. Wir hatten hierbei vorausgesetzt, V sei eine vollständig unthätige Wickelung; nehmen wir nun an, dass dies nicht der Fall sei, sondern dass noch magnetische Linien geschnitten werden — was auch eintreten würde, wenn die Bürste nicht zum neutralen Punkte nn_1 vorwärts geschoben wäre, sondern rückwärts weiter nach links stände — dann ist während des Kurzschlusses bei dem Vorbeigange der Wickelung an der Bürste in ersterer eine elektromotorische Kraft wirksam. Wenn diese auch gering ist, so kann sie doch für den Augenblick einen starken Strom erzeugen, weil der kurz geschlossene Widerstand klein ist. Deshalb tritt die Funkenbildung stärker auf, als wenn die Wickelung ganz unthätig wäre. Betrüge der Widerstand der Wickelung z. B. 0,001 Ohm, und bewegte sie sich kurz geschlossen in einem Felde, das 5 Volt hervorzubringen vermag, so würde der Strom in der Wickelung auf 5000 Ampère ansteigen.

Es möge nun die Bürste eben so weit in der anderen Richtung — im Sinne der Drehung des Ankers¹⁾ — verschoben werden, so dass, wenn die Wickelung an der Bürste vorbeigeht, sie eben beginnt rechts nahe der Polecke in das Feld einzutreten. Dann schneidet die Wickelung die magnetischen Linien so, dass sich ein Strom entgegengesetzter Richtung zu bilden sucht. Die ideale Anordnung wird erreicht, wenn die Bürsten gerade soweit jenseits des Punktes des Maximums der elektromotorischen Kraft verschoben werden, dass in den Abtheilungen, während sie unter der Bürste weggehen und kurz geschlossen werden, thatsächlich eine geringe entgegengesetzt gerichtete elektromotorische Kraft inducirt würde. Diese Wirkung sollte in jeder folgenden Abtheilung gerade so lange währen, um den noch kreisenden Strom zu hemmen, einen Strom in entgegengesetzter

1) Bei einem Motor müsste die Verschiebung im entgegengesetzten Sinne stattfinden, vergl. Kap. XX.

Richtung zu erregen und ihn in seiner Stärke dem in der anderen Hälfte des Ankers kreisenden Strome, der sich mit dem ersteren vereinigen will, entsprechend anwachsen zu lassen. Könnten diese Bedingungen erfüllt werden, so entstände keine Funkenbildung. Ein magnetisches Feld von der Stärke, welche erforderlich ist, um die Umkehrung in der umgeschalteten Abtheilung des Ankers zu erzielen, lässt sich in der Regel gerade ausserhalb der Spitze des Polstückes finden, denn hier besitzen die magnetischen Linien eine Dichtigkeit, die sehr schnell zunimmt. Da zur Umkehrung stärkerer Ströme ein stärkeres Feld erforderlich ist, als für schwächere Ströme, so folgt, dass der Verschiebungswinkel für die Bürsten bei stärkeren Strömen etwas grösser sein muss, als für schwache Ströme.

Für die Umkehrung des Stromes ist eine gewisse Zeit erforderlich; die Bürsten dürfen daher nicht so dünn sein, dass sie nur eben die Breite der zwischen den Stromwenderstäben befindlichen Isolirschrift überschreiten. In der That kann zuweilen die Funkenbildung einfach durch Verwendung dickerer Bürsten verhindert werden, wodurch die Zeit des Kurzschlusses der Ankerabtheilungen etwas verlängert wird.

Sind die Bürsten zu dünn oder sind sie nicht genügend weit vorwärts geschoben, so bilden sich Funken. Werden sie über die neutralen Punkte hinaus verschoben, so ist die Funkenbildung im Allgemeinen geringer. Danach herrscht also in der Regel starke Funkenbildung, wenn die Verschiebung zu gering ist, geringe Funkenbildung bei zu grosser Verschiebung, während die Funkenbildung bei richtiger Verschiebung verschwindet. Ist die Verschiebung grösser als nothwendig, so entsteht ein Energieverlust. Derselbe beruht auf der Erzeugung eines unnöthig starken umgekehrten Stromes in der kurz geschlossenen Wicklung. Wenn die Verschiebung über den neutralen Punkt hinausgeht, so äussern überdies alle Wicklungen, die zwischen dem neutralen Punkte und dem Durchmesser der Stromwendung liegen, elektromotorische Gegenkräfte, so dass das Potential an den Bürsten unter das Maximum fällt.

Wenn in einer Dynamomaschine der Ankerstrom sehr stark und der Feldmagnet sehr schwach ist, so kommt es vor, dass man für die Bürsten keine Lage finden kann, in der die Feldstärke hinreicht, um den Strom in den Abtheilungen umzukehren. Je grösser die magnetische Verzerrung ist, um so schwächer wird das magnetische Feld gerade an der Stelle, wo ein starkes Feld zur Vermeidung der Funkenbildung nothwendig ist. Die Funkenbildung bei einer solchen

Maschine ist nicht zu verhindern. Es ist einleuchtend, dass die Funkenlosigkeit begünstigt wird, wenn man: 1. dem Anker viele Abtheilungen giebt, so dass die Umkehrungen der Ströme sich so zu sagen im Kleinen vollziehen können; 2. den Feldmagnet verhältnissmässig stark herstellt; 3. die Polflächen so gestaltet, dass sie ein geeignetes magnetisches Feld von genügender Stärke liefern; 4. den Bürsten eine passende Dicke und eine gute Contactfläche giebt (vergl. auch Kap. XVI).

Ausser der gewöhnlichen Ursache der Funkenbildung, die wir soeben kennen gelernt haben, giebt es noch einige besondere Veranlassungen. In Dynamomaschinen (besonders solchen für Bogenlicht), die für hohe Spannung von etwa 1000 Volt oder darüber gebaut sind, tritt zuweilen eine Erscheinung ein, die man als »Ueberblitzen« bezeichnen kann. Ein langer blauer Funke springt bei einer plötzlichen Aenderung des Widerstandes im Stromkreise um den Umfang des Stromwenders von Bürste zu Bürste. Dieser, sich mehr in der Art eines Lichtbogens zeigende Funke stört wenig, wenn es sich um Maschinen mit Stromwendern aus wenigen, durch Luftzwischenräume getrennten Theilen handelt; er ist dagegen sehr schädlich für solche Maschinen, die Stromwender gewöhnlicher Art, etwa mit Glimmerisolirung zwischen den Stäben, besitzen; denn letztere werden durch den Funkenbogen leicht kurz geschlossen.

Eine andere Ursache der Funkenbildung wird durch Mangel an Symmetrie in der Wickelung des Ankers begründet. Wenn zufällig eine der Abtheilungen kurz geschlossen oder ihre Verbindung mit den benachbarten Abtheilungen unterbrochen ist, wird Funkenbildung an jener Stelle des Stromwenders eintreten. Wenn die Bürsten hüpfen, weil der Stromabgeber uneben ist, oder die Bürstenhalter fehlerhaft sind, so entsteht eine andere, recht häufige Ursache der Funkenbildung.

Früher wurde die Thatsache, dass man die Bürsten verschieben muss, einer Langsamkeit in der Entmagnetisirung des Ankereisens zugeschrieben; aber diese Ansicht ist irrig. In der That ist das Umgekehrte wahrscheinlich zutreffend. Weiteres über diesen Gegenstand ist im Anhang 5 der 3. Auflage dieses Werkes nachzusehen.

Die Erzeugung von Wirbelströmen in einem Theile des umlaufenden Ankers muss nothwendigerweise von einer entmagnetisirenden Wirkung begleitet werden und demzufolge die Verschiebung beeinflussen.

Entmagnetisierende Wirkung des Ankers.

Verschiebt man bei einer Dynamomaschine die Bürsten nach vorwärts, um die Funkenbildung zu hemmen, so entsteht daraus eine andere Gegenwirkung: es tritt eine Neigung zu entmagnetisieren, eine »entmagnetisierende Kraft« auf. Dass der Ankerstrom in dieser Art wirkt, ersieht man leicht aus der Fig. 68.

Feldmagnet und Anker sind wie früher dargestellt, die Bürsten haben eine nach vorwärts gerichtete oder positive Verschiebung erhalten, die neutrale Linie nn_1 liegt schräg. In den Ankerleitern links von der neutralen Linie fließen die Ströme gegen den Beobachter, rechts von der Linie von dem Beobachter weg. Die beiden

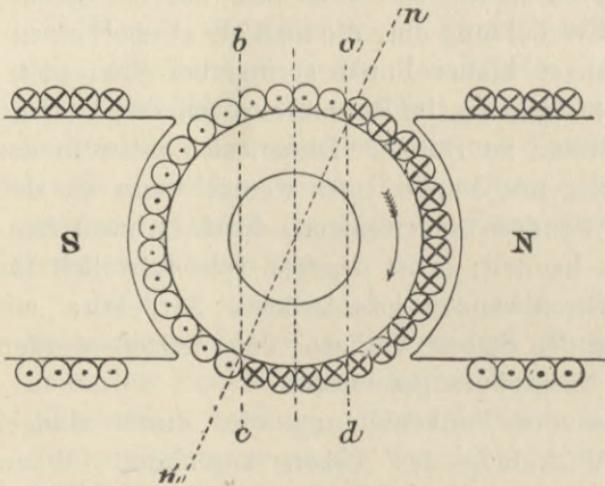


Fig. 68. Entmagnetisierende Wirkung des Ankerstromes in einem Stromerzeuger.

Linien ad und bc seien quer über den Anker durch die Punkte der Stromwendung entsprechend den beiden Bürsten gezogen. Diese Linien schneiden die Aussenlinie des Ankers in vier Punkten. Die Zeichnung enthält 32 Leiter um den Ankerkern. Ist dieser als Trommel gewickelt, so sind die Verbindungen

an den Endflächen etwa wie in Fig. 69 angegeben, gestaltet; jeder Leiter ist quer über die Endfläche durch eine doppelt gekrümmte Verbindung zu dem Leiter geführt, der dem entgegengesetzt liegenden sich zunächst befindet¹⁾. Soweit magnetisierende Wirkungen in Betracht kommen, bedingen die Endverbindungen keinen Unterschied, vorausgesetzt, dass sie mit dem in Fig. 68 dargestellten Stromlauf vereinbar sind, d. h. der Strom muss in den 16 Leitern links von nn_1 nach vorwärts und durch die 16 Leiter rechts von nn_1 zurückfließen. Nehmen wir an, dass die vier Leiter mit den Nummern 29 bis 32 (zwischen d und e) über die Endflächen²⁾ hinweg mit den Leitern 13 bis 16 (zwischen b und a) verbunden sind; die Leiter 1 bis 12 (c bis b)

1) Wegen der verschiedenen Arten von Trommelwickelungen vergl. Kap. XII.

2) Swinburne, Journal of the Institution of Electrical Engineers, Bd. 15, S. 542. 1886.

seien mit den Leitern 17 bis 28 (*a* bis *d*) in Verbindung. Die Ankerwindungen sind nunmehr in zwei Abtheilungen zerlegt, eine wagerechte mit 12 Windungen, die den Anker quer zu magnetisiren sucht, und eine senkrechte Abtheilung von vier Windungen, die zu entmagnetisiren sucht; man erkennt, dass die Richtung des Stromes um die letztere Abtheilung herum entgegengesetzt ist der Richtung des Stromes in den magnetisirenden Windungen. Die Breite der entmagnetisirenden Abtheilung steht im Verhältnisse zu dem Verschiebungswinkel der Bürsten, da sie den doppelten Winkel umfasst. Führt der Anker 100 A Strom, so nimmt, da zwei Stromwege im Anker vorhanden sind (S. 60 und 68), jeder Leiter 50 A auf. Die Zahl der Ampère-Windungen der quermagnetisirenden Kraft beträgt daher $50 \times 12 = 600$, die Zahl der Ampère-Windungen der ent-

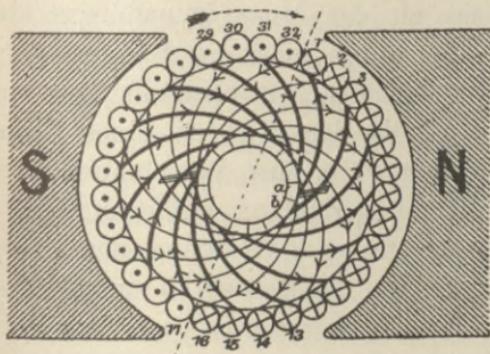


Fig. 69. Verbindungen am Ende einer Trommelwicklung.

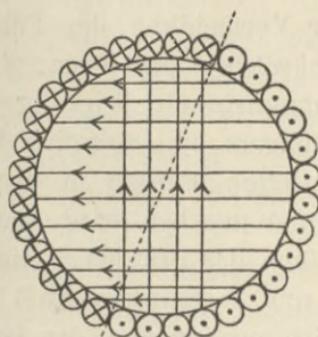


Fig. 70. Quermagnetisirende und entmagnetisirende Leitergürtel.

magnetisirenden Kraft $50 \times 4 = 200$. Wie wir gesehen haben, stört die quermagnetisirende Wirkung das Feld und vermindert an sich etwas die magnetische Strömung, die den Anker von einer Seite zur anderen durchdringt, weil bei der schrägen resultirenden Richtung der Magnetisirung die gesteigerte Strömung eine grössere Sättigung in den Polecken herbeizuführen sucht.

Ueber die Wirkung der Quermagnetisirung findet man Untersuchungen von Siemens und von Schultze in Wiedemann's Annalen, Bd. 14; S. 634, 1882 und Bd. 24, S. 663, 1885¹⁾. Schultze fand bei 24 Versuchen, dass die Quermagnetisirung eines Eisenkernes stets die Längsmagnetisirung verminderte. Neuere Versuche über diese Wirkungen sind von Frölich, Kenelly²⁾ und Stromberg³⁾ angestellt worden.

1) Vergl. auch Oberbeck, Habilitationsschrift, 1878.

2) Electrician, Bd. 25, S. 111. 1890.

3) Stromberg, Centralblatt für Elektrotechnik, Bd. 9, S. 283. 1887.

Bei einer von Ayrton¹⁾ geprüften Manchestermaschine waren 5846 erregende Ampère-Windungen erforderlich, wenn keine Lampen eingeschaltet waren und 10000, wenn die Maschine ihren vollen Strom abgab; von der 4154 Ampère-Windungen betragenden Differenz entfielen 1754 auf Ausgleichung des Spannungsverlustes (hervorgerufen durch den inneren Widerstand und verminderte Durchlässigkeit), und 2400 auf die Ausgleichung der entmagnetisirenden Wirkung des Ankerstromes, welche durch die zur Vermeidung der Funkenbildung nothwendige Verschiebung der Bürsten hervorgerufen wird.

Je weiter man die Bürsten in einer als Stromerzeuger benutzten Maschine verschiebt, desto grösser wird die entmagnetisirende Wirkung des Ankerstromes. Bei Triebmaschinen ist die Richtung des Ankerstromes entgegengesetzt zu der einer Dynamomaschine, zur Vermeidung der Funkenbildung muss man die Bürsten daher rückwärts verschieben; diese Verschiebung ruft ebenfalls eine entmagnetisirende Wirkung hervor. Falls den Bürsten eines Stromerzeugers eine negative Verschiebung (d. h. eine Verschiebung vom neutralen Punkte in dem der Drehungsrichtung entgegengesetzten Sinne) gegeben wird, hat die magnetisirende Wirkung der Ankerströme das Bestreben, die Magnetisirung des Kernes zu unterstützen. J. und E. Hopkinson²⁾ haben sogar nachgewiesen, dass bei Rückwärtsverschiebung der Bürsten eine Maschine sich lediglich durch die Ankerströme erregen kann; in solchen Fällen entsteht aber eine verderbliche Funkenbildung. Die entmagnetisirende Wirkung ist proportional der Zahl der wirksamen Ampère-Windungen des Ankerkreises, die den magnetischen Kreis umgeben und deshalb proportional der wirksamen Zahl der Ampère-Windungen, die, wie wir sahen, in einer Zone von der doppelten Winkelbreite des Verschiebungswinkels liegen³⁾. Nach Kapp ist die Zahl der zum Ausgleich erforderlichen Ampère-Windungen in der Praxis etwas kleiner.

Zur Ausgleichung der magnetisirenden Gegenwirkung der Ankerströme sind verschiedene Mittel in Vorschlag gebracht worden, um so den Veränderungen in der Verschiebung zu begegnen. Nach einem von Mather⁴⁾ herrührenden Vorschlage wurde ein kleiner,

1) Journ. Inst. Electr. Engin., Bd. 19, S. 175. 1890.

2) Phil. Trans. 1886. Theil 1, S. 347.

3) Nach Peuckert ist die entmagnetisirende Wirkung des Ankerstromes der Potenz $\frac{4}{3}$ des Ankerstromes proportional. Centralbl. f. Elektrot., Bd. 9 S. 484. 1887

4) La Lum. Électr., Bd. 19, S. 404. 1895.

senkrecht zwischen die Polstücke gestellter Elektromagnet in Stabform durch den Ankerstrom erregt. Von Swinburne¹⁾ sind die Vortheile verschiedener ähnlicher Anordnungen zu dem gedachten Zwecke erörtert worden. E. Thomson schlägt vor, eine Wickelung auf einem beweglichen Gestell über dem Anker anzubringen und sie zu neigen, bis der neutrale Punkt zurückverlegt worden ist. Diese sowie neuere Vorschläge von Ryan, Sayers und Mordey werden später im Kapitel XVI näher betrachtet werden.

Die Rückwirkung des Ankers auf die Magnetisirung der Feldmagnete kann auch untersucht werden mit Hilfe der charakteristischen Curven der Dynamomaschinen (vergl. Kap. X), die man zur Darstellung des Ansteigens der elektromotorischen Kraft der Maschine im Verhältniss zu der Stromstärke benutzt, da dieses Ansteigen der Magnetisirung des Ankers proportional ist. Die charakteristischen Curven fast aller Reihenmaschinen zeigen aber eine entschiedene Neigung, nach der Erreichung eines Maximums abzufallen; bei einigen Maschinen, z. B. bei Maschinen mit Guss-eisenring der älteren Form von Brush, tritt diese Wirkung deutlich hervor. Die elektromotorische Kraft vermindert sich, obwohl die magnetisirende Wirkung der Feldmagnet-Wickelung wächst. Zum Theil stammt die Wirkung von der Verzerrung des magnetischen Feldes her, meist aber von dem entmagnetisirenden Einflusse, welchen eine grössere Verschiebung der Bürsten ausübt. Bei der älteren Form der Maschine von Brush ist es mindestens bezeichnend, dass in dieser, wo das Herabsinken der elektromotorischen Kraft bedeutend ist, auch eine grosse Menge Eisen sich im Anker befindet und die Verschiebung der Bürsten stark veränderlich ist.

Die Verschiebung der Bürsten, die Funkenbildung und das zur Umkehrung des Stromes in einer Abtheilung nothwendige Feld werden im Kapitel XVI noch näher betrachtet werden, und zwar mit Rücksicht auf den Bau von Maschinen und die Belastung (oder Ampère-Windungen), die ein Anker zu ertragen vermag.

Todte Umläufe.

Die verschiedenen Gegenwirkungen des Ankers, welche von der Geschwindigkeit der Drehung abhängig sind, bewirken, dass die elektromotorische Kraft einer Maschine, welche durch einen constanten Strom erregt wird, nicht genau proportional der Geschwindigkeit

1) Journ. Inst. Electr., Bd. 19, S. 105. 1890.

zunimmt, sondern bei grösserer Umdrehungszahl etwas zurückbleibt. Die Maschine arbeitet alsdann, als wenn eine gewisse Zahl der Umdrehungen nicht wirksam wäre. Unter der Bezeichnung »Tode Umläufe« wollen wir also diejenige Zahl verstehen, um welche die wirkliche Umdrehungszahl grösser ist, als sie zur Erreichung einer gewissen elektromotorischen Kraft zu sein brauchte, wenn zwischen beiden Grössen strenge Proportionalität herrschte.

Scheinbarer Widerstand.

Die Selbstinduction der Ankerwickelungen hat noch eine andere Wirkung im Gefolge. In jeder Abtheilung will der Strom fort dauern, und thatsächlich dauert er während einer kurzen Zeit, nachdem die Bürste erreicht worden ist, fort. Dann wird die Energie des Stromes in der Abtheilung zur Erwärmung des Kupferdrahtes während der Zeitdauer des Kurzschlusses verbraucht; danach muss wiederum Energie aufgewendet werden, um den Strom in umgekehrter Richtung in der Wickelung entstehen zu lassen. Alle diese Gegenwirkungen beeinträchtigen natürlich die Abgabe von Strom aus der Maschine, besonders aber der Verlust infolge des Kurzschlusses. Joubert¹⁾ hat gezeigt, dass der nur aus der Umkehrung des Stromes in den Abtheilungen eines Ringankers entspringende Energieverlust gleich $\frac{nLi_a^2}{4}$ in der Secunde ist, wenn n die Zahl der Umdrehungen in der Secunde, L den Coëfficienten der Selbstinduction für den ganzen Ring und i_a den ganzen Ankerstrom bedeutet.

Ayrton und Perry²⁾ haben in neuerer Zeit ausgeführt, dass die Sache auf anderem Wege bequemer zu entwickeln ist.

Da die Energie eines den Widerstand r durchfliessenden Stromes gleich ri^2 in der Secunde ist, so ist klar, dass der von der Selbstinduction herrührende Energieverlust ebenso betrachtet werden kann, als wenn ein Widerstand vom Werthe $r = \frac{nL}{4}$ im Anker hinzugefügt wird. Ein in Bewegung befindlicher Anker besitzt daher einen scheinbaren Zuwachs an Widerstand, der proportional der Geschwindigkeit ist. Dieser von der Selbstinduction herrührende Zuwachs kann durch Vermehrung der Abtheilungen in der Wickelung

1) Compt. Rend., 23. Juni 1880; 9. Januar 1882; 5. März 1883; L'Electricien, April 1883.

2) Journ. Soc. Electr. Eng. and Electr., Bd. 12, Nr. 49. 1883.

nicht fortgeschafft werden. Eine Verminderung ist möglich durch Anwendung einer grösseren Menge Eisens im Anker und einer geringeren Windungszahl des Drahtes. Der angegebene Werth für den scheinbaren Widerstand gründet sich auf die Annahme, dass während des Kurzschlusses der Strom in der betreffenden Abtheilung verschwindet. Wird aber der Strom durch Einführung einer elektromotorischen Gegenkraft angehalten und umgekehrt, so verringert sich der Werth des scheinbaren Widerstandes. Das Vorhandensein eines scheinbaren, mit der Geschwindigkeit veränderlichen Widerstandes wurde zuerst von Cabanellas¹⁾ nachgewiesen.

Wirbelströme.

Noch zwei andere inductive Gegenwirkungen im Anker sind zu betrachten. Wenn Theile des Gestelles, das den Anker trägt, geschlossene Kreise bilden, die von magnetischen Linien geschnitten werden können, so entsteht eine Gelegenheit zur Bildung verderblicher Nebenströme, die in den Theilen umlaufen, diese erhitzen und Arbeit verbrauchen. In dem Eisen der Ankerkerne können, wenn sie nicht gut geblättert sind, innere Wirbelströme (sogen. Foucault-Ströme) entstehen, die Energie verbrauchen und schädliche Wärme erzeugen; derartige Ströme können sogar in den Leitern, von denen die Wickelung des Ankers gebildet wird, hervorgerufen werden, wenn diese massiv, wie die Stäbe der Maschinen zur Lieferung starker Ströme sind.

Frölich wies 1880²⁾ die Wirkung dieser Ströme nach; er schrieb ihnen nicht allein den sonst unerklärten Verlust an Arbeit zu, die elektrisch von einem Stromerzeuger auf eine Triebmaschine übertragen wurde, sondern auch die Verminderung des wirksamen Magnetismus (vorhin als Ergebniss der quer wirkenden Magnetisirung erklärt und von Frölich auf 25 Proc. des gesammten Magnetismus bestimmt), die bei starken Strömen und grossen Geschwindigkeiten bemerkt worden war; im Weiteren gab er dieser Ursache die Schuld am anscheinenden Wachsthum der »todten Umläufe« bei hohen Geschwindigkeiten.

Zweifellos sind derartige Ströme vorhanden; die durch sie verbrauchte Energie ist nahezu dem Quadrate der Geschwindigkeit

1) Compt. Rend., 9. Jan. 1892, vergl. auch Picou, Manuel d'Electrométrie, S. 123 und Lodge im Electrician, 31. Juli 1885.

2) Berl. Akad. Ber., 18. November 1880 und Elektrot. Zeitschr., Bd. 2, S. 174, Mai 1881, ferner Bd. 9, November und Dezember 1888.

proportional¹⁾: jedoch können sie durch besondere Blätterung, Isolation und Zusammensetzung des Ankers unbeschränkt vermindert werden.

Blätterung.

Die Regeln zur geeigneten Blätterung bei Herstellung des Ankers sind für die verschiedenen Theile auch verschieden. Für den Ankerkern wird zu verlangen sein, dass jede Strömung, die parallel den Ankerleitern inducirt werden könnte, vermieden wird; für die Ankerleiter ist es erwünscht, dass eine Strömung von einer Seite oder dem Rande des Leiters zur anderen Seite ausgeschlossen werde. Die Ebenen der Blätterung müssten folglich so angeordnet werden, dass sie rechtwinkelig zu derjenigen Richtung liegen, in der die störenden Ströme entstehen könnten. Da nun die Richtung der inducirten elektromotorischen Kraft, die Richtung der Bewegung und der magnetischen Linien in rechten Winkeln zu einander liegen (vergl. S. 25), so genügt in jedem Falle zur Kennzeichnung der Ebene der Blätterung zu bestimmen, zu welcher der drei genannten Richtungen die Ebene senkrecht stehen soll. Die beiden anderen Richtungen fallen dann in diese Ebene oder stehen zu ihr parallel.

Richtung der	Richtung der Blätterungs-Ebenen		
	in Ankerkernen	in Ankerleitern	in den Polmassen
Bewegung	parallel	senkrecht	parallel
magnetischen Linien	parallel	parallel	parallel
inducirten E. M. K.	senkrecht	parallel	senkrecht

Zu bemerken ist, dass die Blätterung für die Polstücke die gleiche ist wie für den Kern, so dass die Polstücke eigentlich Fortsetzungen der Kernscheiben sind.

Die Nothwendigkeit, die Kerne der Trommel- und Ringanker (falls diese cylindrisch, nicht scheibenförmig sind) in Kernscheiben zu zerlegen, kann man in folgender Weise erläutern: In jedem Leiter, der im linken Zwischenraume sich aufwärts bewegt, wird eine elektromotorische Kraft erzeugt, deren Richtung nach vorn zeigt. Wenn daher der Kern aus solidem Eisen bestände, so würde ein Strom auf dem äusseren Theile der linken Seite des Kernes vorwärts fließen

1) Clausius hat für die Wirkungen der Kreisströme in seinen Gleichungen (Wied. Ann., Bd. 20, S. 354; und Phil. Mag., Ser. 5, Bd. 17, S. 46 u. 119. 1883) Werthe eingeführt. Auch sind sie durch Lorberg theoretisch behandelt worden (Wied. Ann., Bd. 20, S. 389. 1887).

und seinen Rückweg längs der Oberfläche zur Rechten nehmen. Die Zertheilung des Kernes in Scheiben wird derartige Ströme auf das geringste Maass zurückführen. Diese Anordnung verhindert indessen das Entstehen der Ströme nicht gänzlich; wie aus der Fig. 71 hervorgeht, die einen Durchschnitt der Kernscheiben darstellt, besteht für die Wirbelströme die Möglichkeit in der Masse der Scheiben selbst zu fliessen. Man findet in der That, dass eine Erwärmung des Ankers eintritt, wenn die Scheiben zu dick oder ungenügend voneinander isolirt sind; sie findet hauptsächlich an der Aussenfläche des Kernes statt, wo die Wirbelströme am stärksten sind. Als allgemeine Regel kann man festhalten, dass die Kernscheiben keine grössere Stärke als 2 mm besitzen sollen. Die gleiche Stärke

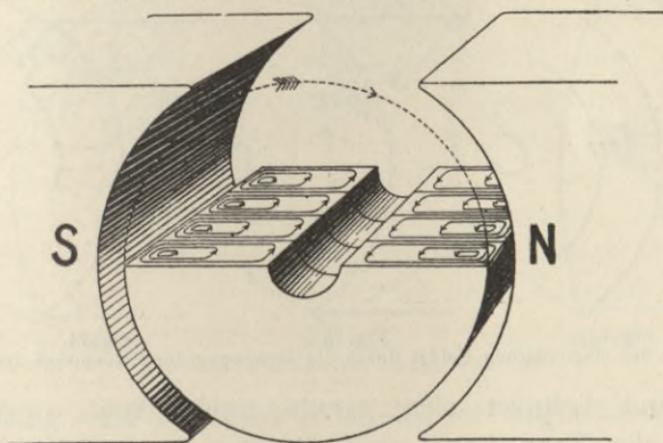


Fig. 71. Wirbelströme in Kernscheiben.

ist für die Bandkerne bei Scheibenringen passend. Der neue geblätterte Anker der Bogenlichtmaschine von Brush verminderte, wenn er an Stelle des alten soliden Ankers benutzt wurde, wesentlich die Zahl der todten Umläufe, abgesehen davon, dass viel Energie, die früher durch Umwandlung in Wärme verloren ging, gewonnen wurde.

Entsteht ein magnetisches Streufeld von den Seiten der Polmassen bis zur Oberfläche der Endscheiben der Kerne, so treten auch in letzteren Wirbelströme auf. Man beugt diesem Uebelstande vor, indem man die Achsenlängen des Ankerkernes etwas grösser herstellt als die Länge der Polmassen, die parallel zur Achse sind.

Bei Ringankern mit innerem Felde (S. 68) werden Wirbelströme in der Triebachse und in den metallischen Haltern, die zur Unterstützung der Kernscheiben dienen, erzeugt; auch hier wird Arbeit verbraucht und in Wärme umgewandelt.

Wirbelströme in den Polstücken.

Sind die Eisenmassen im Anker derartig angeordnet, dass während der Drehung die Vertheilung der Kraftlinien in dem engen Felde zwischen Anker und Polstück sich stetig ändert, so werden Wirbelströme in den Polstücken erregt und bringen eine Erwärmung hervor, wenn auch der gesammte Betrag des Magnetismus im Feldmagnet unverändert bleibt.

Die Fig. 72 bis 77 zeigen diesen Vorgang, der die Wirkung eines wie im Pacinotti'schen Ringe vorspringenden Zahnes auf die Vertheilung des Magnetismus des Polstückes erkennen lässt. Fig. 75 und 76 (entsprechend den Fig. 73 und 74) stellen je ein Paar Wirbelströme dar. Der stärkste Strom fließt zwischen den

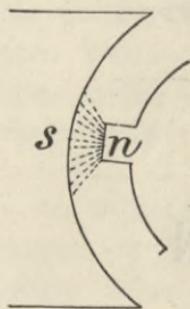


Fig. 72.



Fig. 73.



Fig. 74.

Aenderung des magnetischen Feldes durch die Bewegung der Eisenmasse des Ankers.

Wirbeln und befindet sich gerade unter dem vorspringenden Zahne, wo der Magnetismus am kräftigsten ist; er folgt dem Zahne aufwärts.

Die Fig. 77 zeigt den Vorgang, der sich abspielt, wenn der Zahn sich von dem Polstücke entfernt. Diese Wirbelströme dringen, wenngleich nicht sehr tief, in das Eisen ein. Offenbar sind sie am stärksten in dem Theile des Polstückes, in dem die magnetischen Störungen am stärksten und sehr plötzlich auftreten. Ein Blick auf die Fig. 62, 65, 76 und 77 belehrt uns, dass dies an einem Eckstücke des Polansatzes der stromerzeugenden Maschine der Fall sein wird. Thatsächlich findet man dies bestätigt bei jeder Dynamomaschine mit hornförmigen Polstücken (wie bei der Maschine von Gramme), wenn sie einige Zeit als Stromerzeuger in Betrieb gewesen ist. Die Eckstücke, welche sich in der Richtung der Bewegung hin erstrecken, findet man heiss, während die gegen die Drehung gerichteten Hörner verhältnissmässig kühl bleiben. Wird die Maschine als Triebmaschine benutzt, so erfolgt das Umgekehrte, die mit der Bewegung verlaufenden Hörner sind kalt, die gegen

die Bewegung gerichteten werden heiss. Ein Blick auf das magnetische Feld der Triebmaschine, wie solches im Kapitel XX gezeichnet ist, erklärt den letztgenannten Fall.

Mit dieser Wirkung steht eine andere in naher Verbindung, die dem Verfasser zuerst von Cabanellas auseinandergesetzt wurde. Eine Magneto-Maschine von Gramme mit Dauermagneten verlor an Leistung während ihres Gebrauches als Triebmaschine; die Feldmagnete nahmen an Stärke ab; sobald sie aber als Stromerzeuger benutzt wurde, gewannen die Feldmagnete ihren Magnetismus wieder.

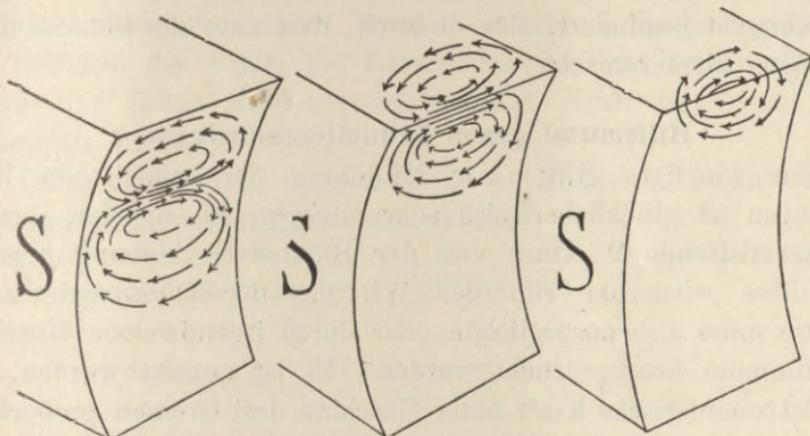


Fig. 75.

Fig. 76.

Fig. 77.

Inducirte Wirbelströme in den Polstücken.

Die Wirkung wird erklärlich¹⁾, sobald der magnetisirende Einfluss der Wirbelströme in Betracht gezogen wird.

Wirkungen der gegenseitigen Induction.

Verschiedene Ankerformen besitzen vermöge ihrer Bauart insofern einen Mangel, als sie zwischen benachbarten Abtheilungen oder Theilen der Wicklung starke Induction zulassen; das Ansteigen des Stromes in einer Abtheilung bewirkt eine entgegengesetzte Induction in einer benachbarten Abtheilung. Diese Ursache verringert die Leistungsfähigkeit der Maschine; ein erhöhter Energieverbrauch ist aber nicht nothwendig damit verbunden.

Die Wirkung der gegenseitigen Induction zwischen benachbarten Theilen oder Abtheilungen der Wicklung darf bei dem Entwurfe von Dynamomaschinen nicht ausser Acht gelassen werden; von ganz besonderer Wichtigkeit aber ist sie, wenn es sich um Wechselstrommaschinen handelt.

1) Vergl. die vom Verfasser auf der internationalen Conferenz der Elektriker zu Philadelphia 1884 gegebene Erklärung (Bericht in Electr. Review, 13. Dec. 1884).

Verzögerung infolge der Selbstinduction.

Die elektrische Trägheit des in den Abtheilungen kreisenden Stromes beeinflusst etwas die Bürstenverschiebung und wirkt auch auf die benachbarten Wickelungen ein. Wenn eine Wickelung kurz geschlossen wird, bevor sie den neutralen Punkt erreicht, so strebt der plötzliche Stoss des in ihr kreisenden Stromes infolge gegenseitiger Induction den Strom in der hinterliegenden Wickelung zu hemmen und den umgekehrten Strom in der vorliegenden Wickelung zu beschleunigen. Diese Wirkungen werden durch Vermehrung der Abtheilungen gemindert, also dadurch, dass man die einzelnen Abtheilungen kleiner macht.

Hilfsmittel gegen Inductionsstörungen.

Ein wichtiges Mittel zur Milderung der schädlichen Rückwirkungen ist glücklicherweise sehr einfach. Es ist klar, dass die entmagnetisirende Wirkung von der Bürstenverschiebung herrührt, und diese wiederum von der Wirkung der Quermagnetisirung. Letztere muss also ausgeglichen oder durch irgendwelche Mittel auf ein Minimum herabgedrückt werden. Es ist gezeigt worden, dass die elektromotorische Kraft einer Maschine drei Grössen proportional ist: der Zahl n der Umdrehungen in der Secunde, der gesammten Zahl \mathcal{S} der Kraftlinien im wirksamen magnetischen Felde und der Zahl N der Leiter, die den Anker umgeben.

Für eine bestimmte Grösse des Ankers sind die inductiven Rückwirkungen proportional N . Können wir N abnehmen lassen, während jeder der anderen Werthe zunimmt, so nehmen die schädlichen Rückwirkungen ab, und wir erhalten doch die frühere elektromotorische Kraft. Die Geschwindigkeit zu steigern, ist aus mechanischen Gründen meistens nicht rathsam. Es bleibt nur die Vermehrung von \mathcal{S} , der Anzahl der Kraftlinien im wirksamen magnetischen Felde übrig.

Diese wird durch Anwendung verhältnissmässig starker Feldmagnete möglich. Sind die Feldmagnete gross, bestehen sie aus Schmiedeeisen, und sind sie genügend geblättert, so kann man ohne Erhöhung der Geschwindigkeit die gleiche elektromotorische Kraft mit einer geringeren Zahl Drahtwindungen im Anker erreichen. Das Ideal einer Dynamomaschine (für gleichbleibende Klemmenspannung) wäre eine Maschine mit nur einer Drahtwindung in jeder Abtheilung. Eine solche würde praktisch keine Bürstenverschiebung erfordern, keine Funken geben, und ihr innerer Widerstand wäre

praktisch gleich Null. Wesentlich ist es, auch darauf zu achten, dass die Verzerrung des magnetischen Feldes und einige der sich ergebenden Störungen zum Theil vermieden werden können; dies erreicht man, wenn die Polflächen so geformt werden, dass sie rechtwinkelig zum Durchmesser der Stromwindung an den Anker näher heranrücken und wenn die Polstücke soweit ausgeschnitten werden, dass die äusseren Kanten weiter zurücktreten. Es ist sehr wohl möglich, durch eine besondere Formung der Polstücke die magnetischen Linien in jeder gewünschten Gegend des magnetischen Feldes zusammenzudrängen. Ryan ¹⁾ hat über die Beziehung zwischen der Polform, der Breite des Zwischenraumes und der resultirenden Curve der inducirten elektromotorischen Kraft besondere Untersuchungen angestellt.

Diese Verhältnisse werden später im Kapitel XVI (Entwurf von Dynamomaschinen) näher erörtert werden.

1) Amer. Inst. Electr. Engineers. 22. Sept. 1891.

Kapitel V.

Mechanische Wirkungen und Gegenwirkungen im Anker.

Zug auf die Ankerwicklung.

Liegt ein stromführender Leiter in einem magnetischen Felde quer zur Richtung der magnetischen Kraftlinien, so erfährt er einen mechanischen Angriff. Eine Kraft sucht den Leiter zur Seite aus dem Felde zu ziehen, sie wirkt rechtwinkelig zu den magnetischen Linien und rechtwinkelig zum Leiter selbst. Von verschiedenen Schriftstellern sind Regeln gegeben worden, um die Beziehung zwischen der Richtung der Kraftlinien, des Stromes und der resultirenden Kraft dem Gedächtniss einzuprägen. Die bequemste Regel hat Fleming gegeben, nach der die drei Richtungen durch den Zeigefinger, den Mittelfinger und den Daumen der linken Hand bezeichnet werden¹⁾. Mit Ausnahme der Fälle, wo die Leiter in Schlitzten oder Löchern der Ankerscheiben eingebettet sind, wirkt der Zug auf die Leiter selbst. Bei einer Triebmaschine ist es der auf die Leiter ausgeübte Zug, der den Anker umtreibt. Bei der stromerzeugenden Maschine wirkt der Zug gegen die Triebkraft der Dampfmaschine und wirkt dem Umlaufe entgegen. Wenn ein Ingenieur eine Dynamomaschine vom mechanischen Standpunkte aus betrachtet,

1) Im Gegensatze zu Seite 25, wo für den in einer Maschine erzeugten Strom die rechte Hand benutzt wird. Man muss festhalten, dass in einer Dynamomaschine die Stromrichtung mit der Richtung der inducirten elektromotorischen Kraft übereinstimmt, während in einer Triebmaschine der Strom gegen die inducirte elektromotorische Kraft fließt. Im Weiteren wirkt in der Dynamomaschine der mechanische Zug gegen die Richtung der Bewegung, während in einer Triebmaschine der Zug die Bewegung in seiner Richtung selbst hervorbringt. Deshalb bedingt die Regel den Gebrauch der rechten Hand, wenn es sich um einen Stromerzeuger handelt, und der linken Hand, wenn es sich um eine Triebmaschine handelt, um die Beziehung zwischen Magnetismus, Strom und Bewegung darzustellen.

so ist es häufig für ihn schwierig, zu verstehen, weshalb für die Maschine eine so grosse Triebkraft erforderlich wird. Er sieht, wie der Anker mit genügendem Spielraum zwischen den Polflächen des Feldmagnetes umläuft. Die Reibung in den Lagern verzehrt nur einen kleinen Bruchtheil der von der treibenden Maschine abgegebenen Kraft. Er sieht ferner, wie die Bürsten gegen den kupfernen Stromabgeber pressen, weiss aber, dass ihre Reibung ebenfalls vernachlässigt werden kann; überhaupt versteht er sehr bald, dass die Reibung bei der Thätigkeit der Maschine keine Rolle spielt. Wo bleibt die aufgewendete Arbeit? Weshalb wird ununterbrochen eine solche Kraft zur Aufrechterhaltung des Umlaufes erforderlich? Die Antwort darauf lautet: Es besteht ein fortwährender Zug der unsichtbaren magnetischen Linien auf die Leiter, durch die der Strom fließt; die Erzeugung des Stromes hängt davon ab, dass die Leiter durch das Feld getrieben werden, das einen Zug ausübt. In jeder Form eines Apparates, der mit Hilfe der Magnetinduction Ströme erzeugt, rufen die erzeugten Ströme eine mechanische Gegenwirkung hervor; diese sucht die Bewegung zu hemmen, welche die Ströme erzeugt.

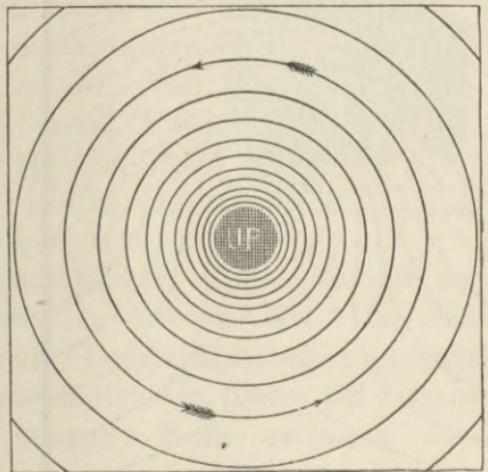


Fig. 78. Magnetisches Feld um einen geraden stromführenden Leiter.

Der Zug eines magnetischen Feldes auf einen stromführenden Leiter möge nun vom magnetischen Standpunkte aus betrachtet werden. Wie früher erwähnt, wird ein derartiger Leiter von einem Wirbel magnetischer Linien umgeben. Um einen langen, geraden, nicht im magnetischen Felde befindlichen Leiter bilden die magnetischen Linien ein System concentrischer Kreise (Fig. 13), die in der Nähe des Leiters dicht zusammen und entfernter von ihm weiter auseinanderliegen, wie die Fig. 78 im Allgemeinen veranschaulicht. Wenn der Strom gegen den Beobachter zu oder aufwärts gerichtet ist, so ist in der Figur, die einen Querschnitt des Leiters darstellt, die positive Richtung längs der magnetischen Linien nach links oder entgegengesetzt dem Zeigergange einer Uhr gerichtet. Wird ein solcher Leiter in ein gleichförmiges magnetisches Feld gebracht, z. B. zwischen einen starken Nordpol zur Rechten und einen

Südpol zur Linken, so entsteht ein zusammengesetztes Feld, das aus der Vermischung der magnetischen Linien des Leiters mit denen des Feldes herrührt. Bei der Betrachtung des gestörten magnetischen Feldes hat man festzuhalten, dass die entstehenden mechanischen Wirkungen stets bekannt sein werden, wenn man die magnetischen Linien als elastische Fäden ansieht, die sich verkürzen können. Es herrscht in der That längs der magnetischen Linien eine Spannung und rechtwinkelig zu ihnen ein Druck; beide

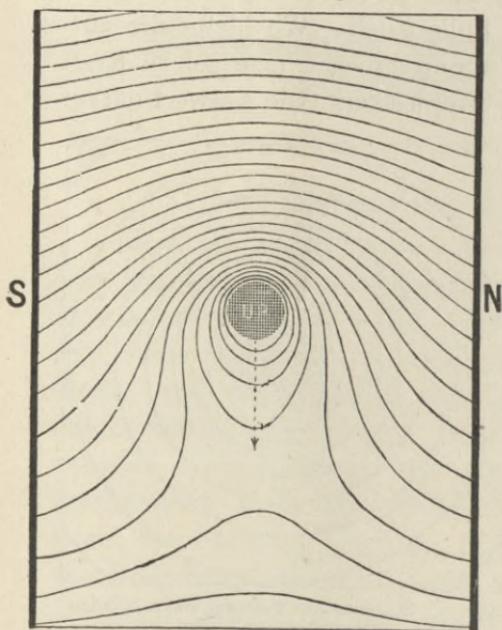


Fig. 79. Stromführender Leiter im magnetischen Felde.

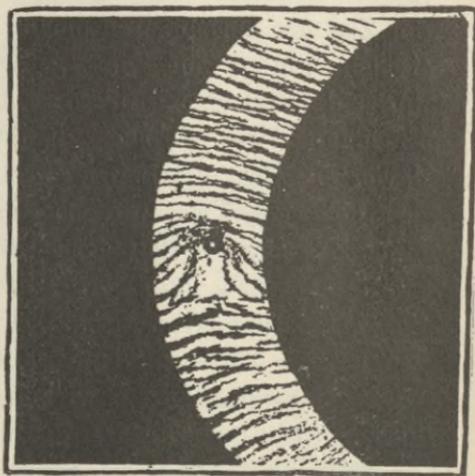


Fig. 80. Magnetisches Feld um einen Leiter in einem magnetischen Zwischenraum.

Größen sind in jedem Punkte dem Quadrate der Dichtigkeit der Linien proportional.

Ein Blick auf die Linien in Fig. 79 zeigt, dass ein resultirender Zug auf den Leiter in der Richtung des punktierten Pfeiles vorhanden ist. Das um einen leitenden Draht in einem Zwischenraume zwischen zwei Polen erzeugte magnetische Feld, wie man es mittels Eisenfeilspänen untersuchen kann, stellt die Fig. 80 dar. Dieses Bild giebt annähernd das wieder, was in einer Dynamomaschine oder einer Triebmaschine vorgeht, und zwar in jedem der beiden Zwischenräume zwischen dem Ankerkern und der benachbarten Polfläche. Jeder Leiter des Ankers wird gleichartig von einer Kraft angezogen, die der magnetischen Feldstärke und der Stromstärke proportional ist.

Wirkung des Einbettens der Ankerleiter.

Wenn die Leiter in Schlitzten oder Löchern im Ankereisen eingebettet sind (vergl. Fig. 213 bis 217), wirkt der Zug nicht auf die Kupferleiter, sondern auf das Eisen, da das magnetische Feld zwischen Ankern und Poloberflächen durch den Strom im eingebetteten Leiter verzerrt wird. In der That liegt in diesem Falle der Leiter nicht mehr in einem kräftigen magnetischen Felde, da die meisten Kraftlinien zu beiden Seiten neben ihm direct in das Ankereisen treten und nur wenige Linien ihn schneiden. Fig. 81 mag dies veranschaulichen. Es scheint paradox, dass der so eingebettete Leiter, obwohl er gegen mechanischen Zug und ebenso gegen Wirbelströme geschützt ist, weil er sich nicht im Felde befindet, trotzdem bei seiner Umdrehung alle die Kraftlinien gerade so schneidet, als wenn er nicht geschützt wäre. Die Wirkung ist so, als wenn die Kraftlinien von Zahn zu Zahn quer durch die Schlitzte überspringen, anstatt sie mit der gewöhnlichen Winkelgeschwindigkeit zu überschreiten. Zu den bereits erwähnten Vortheilen dieser Constructionsformen kommt noch der sehr wichtige hinzu, dass hierbei die Breite des magnetischen Zwischenraumes auf das geringste Maass beschränkt werden kann.

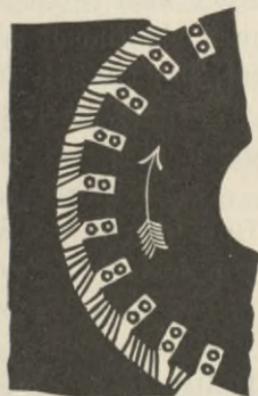


Fig. 81. Magnetisches Feld bei eingebetteten Leitern.

Drehmoment und Geschwindigkeit.

Die Leistung einer Kraft lässt sich stets durch das Product zweier Factoren ausdrücken. Handelt es sich um eine geradlinige Bewegung, so ist die Leistung gleich dem Product aus Kraft und Geschwindigkeit. Wirkt z. B. eine Kraft, die gleich einem Gewichte von 30 kg ist, längs eines Riemens, und beträgt die Riemen-geschwindigkeit 600 m in der Minute, so stellt sich die Leistung auf 18000 Kilogramm-Meter in der Minute oder auf 4 Pferdekkräfte.

Die Leistung lässt sich aber ebensogut durch das Drehmoment und die Winkelgeschwindigkeit ausdrücken; bei der Uebertragung von Arbeit durch eine umlaufende Welle eignen sich diese Grössen besser zur Rechnung. Das Drehmoment bezeichnen wir mit D . Wirkt eine Kraft F am Radius r , so ist das Drehmoment $D = Fr$. Ist F in Dynen, r in Centimetern gegeben, so erhält man D in Dynen-Centimeter.

Zur Umrechnung von
 Dynen-Centimeter in Gramme-Centimeter ist zu dividiren durch 981,
 » » » Kilogramm-Meter » » » » 981 · 10⁵.

Die Winkelgeschwindigkeit wird gewöhnlich durch die Zahl der Umläufe in der Minute oder auch in der Secunde ausgedrückt. Auch lässt sie sich in Radianen für die Secunde darstellen, indem man als Einheit den Winkel wählt, dessen Bogen gleich dem Radius ist, so dass 2π Radianen eine Umdrehung oder 360 Grad ausdrücken.

Die Winkelgeschwindigkeit werde mit ω bezeichnet; bedeutet n die Zahl der Umläufe in der Secunde, so ist $\omega = 2\pi n$.

Zur Umrechnung von
 Umläufen in der Secunde in Radianen in der Secunde ist zu multiplizieren mit 2π ,
 » » » Minute » » » » ist zu dividiren durch 9,55,
 Radianen in der Secunde in Umläufe in der Minute ist zu multiplizieren mit 9,55.

Zwischen der linearen wirkenden Kraft F , der linearen Geschwindigkeit v , dem Drehmoment D , der Winkelgeschwindigkeit ω , dem Radius r , den Umläufen in der Secunde n und der Leistung P bestehen folgende Beziehungen:

$$P = vF = \frac{v}{r} \times Fr = \omega D = 2\pi n D.$$

Die Leistung P wird in Erg für die Secunde ausgedrückt sein, wenn v in Centimeter für die Secunde und F in Dynen, oder wenn D in Dynen-Centimeter gegeben ist.

Zur Umrechnung von
 Erg in der Secunde in Watt (W) ist zu dividiren durch 10⁷,
 » » » » » kgm i. d. Sec. » » » » 9,81 · 10⁷,
 » » » » » Pferdekraft » » » » 736 · 10⁷,
 Watt in Pferdekraft » » » » 736.
 » » Kilowatt » » » » 1000.

Leistung von Dynamomaschinen und Motoren.

Eine gute Dynamomaschine kann über 90 Proc. der aufgewendeten mechanischen Leistung in elektrische Leistung umsetzen. Ebenso kann eine gute Triebmaschine über 90 Proc. der aufgewendeten elektrischen Leistung wieder in mechanische Leistung umsetzen. Elektrische wie mechanische Leistung können beide durch dieselben Einheiten ausgedrückt werden, entweder durch Pferdekraft oder Watt oder Kilowatt.

Angenäherte Berechnungen der mechanischen Leistung, die zum Betrieb einer Dynamomaschine von vorgeschriebener elektrischer Leistung nothwendig werden, sind ohne Schwierigkeiten anzustellen. Man multiplicirt die zu liefernde Stromstärke i Ampère mit der Spannung e Volt des Stromes und erhält damit die elektrische Leistung in Watt (Volt-Ampère). Diese Zahl durch 736 dividirt, ergibt die elektrische Leistung in Pferdekraften, die etwa 90 Proc. der mechanischen, an der Welle der Dynamomaschine verfügbaren Pferdekraften betragen.

Beispiel: Eine Dynamomaschine soll für 600 Glühlampen 300 Ampère bei einer Spannung von 105 Volt liefern. Die Leistung beträgt 31500 Watt = 42,8 elektrische Pferdekraften. Dazu müssen 47,5 oder rund 48 mechanische Pferdekraften angewendet werden.

Umgekehrt stellt sich die Berechnung der erforderlichen elektrischen Leistung für einen Elektromotor.

Beispiel: Ein Motor soll 5 Pferdekraften liefern. Die Multiplication mit 736 ergibt 3680 Watt, die etwa 90 Proc. der aufzuwendenden elektrischen Leistung betragen, letztere stellt sich daher auf 4089 Watt. Besitzt der Betriebsstrom 200 Volt Spannung, so beträgt die erforderliche Stromstärke etwas mehr als 20 Ampère.

Drehmoment und Stromstärke.

Da die vom Anker einer Dynamomaschine erzeugte Leistung das Product aus Spannung und Stromstärke — Volt und Ampère — und die an die umlaufende Welle abgegebene Leistung ebenso das Product aus Geschwindigkeit und Drehmoment ist, so besitzt die Beziehung zwischen diesen Grössen eine Bedeutung.

Bezeichnet E die im Anker erzeugte Spannung, i_a den Strom im Anker, so besteht die Beziehung:

$$E i_a = 2 \pi n D \times 9,81,$$

wenn D in Kilogrammmetern ausgedrückt ist und n die Zahl der Umläufe in der Secunde bedeutet. Bei gleichbleibendem Magnetismus ist E proportional der Geschwindigkeit, und die Grundgleichung für eine zweipolige Maschine lautet:

$$E = n \mathfrak{S} N : 10^8,$$

wenn N die Anzahl der Leiter um den Anker und \mathfrak{S} die magnetische Strömung im Kerne bedeutet. Demnach ist:

$$D = \frac{\mathfrak{S} N i_a}{2 \pi \times 9,81 \times 10^8} = \frac{\mathfrak{S} N i_a}{61,6 \times 10^8}$$

in Kilogrammmeter.

Wenn in einer gegebenen Maschine der Magnetismus gleichbleibend ist, so erhellt aus vorstehender Formel, dass das Drehmoment nicht von der Geschwindigkeit abhängt, sondern nur von der Stärke des Stromes im Anker und vom Magnetismus. Die Gleichungen gelten ebensowohl für Dynamomaschinen als für Elektromotoren. Sie zeigen, dass man zur Herstellung von Maschinen für geringe Umlaufzahl für ein sehr starkes magnetisches Feld sorgen muss; denn nur dadurch, dass man \mathfrak{S} gross macht, vermag die Maschine bei geringer Geschwindigkeit die erforderliche Spannung zu liefern, oder der Elektromotor das nothwendige Drehmoment zu entwickeln.

Die Beziehungen zwischen Geschwindigkeit und Drehmoment lassen sich durch Curven — mechanische Charakteristiken — darstellen; eine Anzahl solcher Curven für verschiedene Fälle findet man in Kapitel XX.

Zug auf die Ankerleiter.

Wir sind nunmehr im Stande, einzusehen, dass wirklich Zug auf die Ankerleiter ausgeübt wird. Sehen wir jetzt für einen Augenblick von dem Falle ab, dass wir es mit ins Ankereisen eingebetteten Leitern zu thun haben, so können wir den Betrag des Zuges ermitteln. Es giebt drei Methoden zu diesem Zwecke; zwei beruhen auf Rechnung mit elektrischen, eine beruht auf Rechnung mit mechanischen Grössen.

Methode I. In der letzten Rechnung wurde das Drehmoment bestimmt, hieraus wird die am gesammten Umfange wirkende Kraft durch Division mit dem bekannten Radius des Ankers gefunden. Die Kraft für einen Leiter erhält man durch Division mit der Zahl der wirksamen Leiter.

Als Beispiel diene eine Maschine von Edison-Hopkinson, in der $i_a = 326$, $N = 80$, $\mathfrak{S} = 10850000$, der Radius $= 0,14$ m. Hieraus findet man $D = 45,9$ kgm und durch Division dieses Werthes durch den Radius die gesammte am Umfang wirkende Kraft $= 318$ kg. Da sich aber nur 58 Leiter zu gleicher Zeit im magnetischen Felde befinden, so entfällt auf jeden Leiter eine durchschnittliche Kraft von 5,66 kg. Ist das magnetische Feld in den Zwischenräumen nicht gleichförmig, so erleiden diejenigen Leiter den grössten Zug, die im stärksten Felde liegen.

Methode II. Der Zug auf einen Leiter von der Länge l cm in einem magnetischen Felde von der Stärke \mathfrak{S} beträgt bei einer Stromstärke i

$$f \text{ (in Dynen)} = \frac{i l \mathfrak{S}}{10} \text{ oder}$$

$$f \text{ (in kg)} = \frac{i l \mathfrak{S}}{981 \times 10^4}$$

Die Formel ist nur anwendbar, wenn \mathfrak{S} , die Dichtigkeit des Feldes in dem Zwischenraume, bekannt ist.

Es werde das gleiche Beispiel wie vorher gewählt. Der Strom in jedem einzelnen Leiter ist $= \frac{1}{2} i_a = 163 \text{ A}$ (wegen der Verzweigung), die Länge l eines Leiters sei $= 50,8 \text{ cm}$, die Fläche des Zwischenraumes so, dass auf 1 qcm etwa 6710 Kraftlinien entfallen. Man erhält dann aus der Formel

$$f = 5,56 \cdot 10^6 \text{ Dynen}$$

oder wie vorhin 5,66 kg.

Methode III. Man bestimmt die wirkliche Leistung in Pferdekräften am Anker, multiplicirt sie mit $75 \times 60 = 4500$, um Kilogrammometer in der Minute zu erhalten und dividirt das Ergebniss durch die Umfangsgeschwindigkeit (in Meter für die Minute). Um den Zug auf einen Leiter am Anker zu erhalten, hat man noch mit der Anzahl der Leiter zu dividiren.

Es werde dasselbe Beispiel wie vorher gewählt. Da $i_a = 326 \text{ A}$ und $E = 108,5 \text{ Volt}$ ist, so ist die Zahl der Pferdekräfte $= \frac{326 \times 108,6}{736} = 47,9$. Da der Radius $= 0,14$ ist, so ergibt sich ein Umfang von 0,88 m. Sind, wie vorhin angenommen, 58 Leiter thätig, so beträgt die Kraft auf jeden Leiter

$$\frac{47,9 \times 4500}{660 \times 58} = 5,63 \text{ kg.}$$

Eine bequeme Regel für angenäherte Berechnung ist folgende: Nimmt man als rohen Durchschnitt für das magnetische Feld in dem Zwischenraume eines Stromerzeugers oder einer Triebmaschine 6300 Linien auf das Quadratcentimeter an, so beträgt der Zug für jedes Ampère Strom auf die Länge eines Centimeters des Leiters 0,000635 kg. In Wechselstrommaschinen ist die Feldstärke selten mehr als halb so gross.

Es muss indessen bemerkt werden, dass der auf die nicht eingebetteten Ankerleiter ausgeübte Zug kein stetiger ist. Sobald der Leiter aus dem Zwischenraume hervortritt, besteht in ihm zwar noch ein Strom, der magnetische Zug hat jedoch aufgehört. Während jedes Umlaufes wird der Zug zweimal plötzlich aufgehoben und plötzlich erneuert, wobei die zerrende Wirkung anwächst. In Wechselstrommaschinen verwickelt die Beziehung der Phase der Ströme zu den magnetischen Feldern die Sachlage; statt zu verschwinden, wird der Zug je zweimal in jeder vollen Periode umgekehrt. Die Ankerleiter werden getrieben, während ein rückwärts gerichteter Zug auf sie einwirkt, erhalten dann einen nach vorwärts gerichteten Zug und streben in der Richtung der Drehung voran,

werden, von Neuem angetrieben und streben bei der Umkehrung des Stromes wiederum zu treiben. Wenn die Wechselstrommaschine als Stromerzeuger arbeitet, so sind die zwischenliegenden Antriebe nach vorwärts leicht und von kurzer Dauer; wirkt die Maschine als Motor, so sind die nach rückwärts gerichteten Antriebe von kurzer Dauer.

Man darf ferner nicht ausser Acht lassen, dass auf die Leiter des umlaufenden Ankers auch eine Fliehkraft ausgeübt wird und sie deshalb mit äusseren Bindungen festgehalten werden müssen, wenn sie nicht durch Löcher im Ankerkern geführt sind.

Hilfsmittel für den Antrieb.

Es ist einleuchtend, dass unter den erläuterten mechanischen Bedingungen, wenn die Leiter nicht im Ankerkern eingebettet sind, das Bedürfniss vorliegt, in zuverlässiger Weise die Triebkraft von der Welle auf die Leiter zu übertragen. In der Dynamomaschine sind es die Ankerleiter, die angetrieben werden sollen, im Elektromotor sollen die Ankerleiter die Welle umtreiben.

Für den Bau entsteht ein noch schwierigerer Umstand insofern, als die Kupferleiter in mechanisch zuverlässiger Art, aber nicht metallisch mit der Welle verbunden werden müssen, es ist sogar eine gute Isolirung von der Welle Bedingung. Verschiedene Erbauer befolgen verschiedene Methoden zur Erreichung des Zweckes. Einige setzen auf die Welle eine starke Nabe mit Speichen, die vor der Oberfläche der Kernscheiben vorragen, von diesen durch Zwischenlagen von Isolirungsmaterial getrennt sind und zum Antrieb der Kupferleiter dienen. Andere befestigen die Kernscheiben mechanisch an der Welle und treiben Keile aus Holz oder harter Fiber in Einschnitte an der Peripherie, die dann als Mitnehmer für die Leiter dienen. Werden gezahnte Kernscheiben verwendet, so sind andere Hilfsmittel für den Antrieb nicht erforderlich. Im Kapitel XIII werden die in neuerer Zeit angewendeten praktischen Methoden näher erläutert.

Kraftverluste.

Bisher ist vorausgesetzt worden, dass die an der Welle zum Umtrieb des Ankers aufgewendete mechanische Arbeit gleich der im Anker wirklich hervorgebrachten elektrischen Arbeit sei. Die erstere ist indessen stets grösser als die letztere. Zunächst entsteht ein Verlust durch Reibung in den Lagern u. s. w. Die dann wirklich

auf den Anker übertragene Arbeit wird aber nicht ganz in elektrische Arbeit umgewandelt. Ausser der Reibung in den Lagern und an den Bürsten giebt es noch drei Verlustquellen, und zwar:

1. Luftreibung,
2. Hysteresis,
3. Wirbelströme.

Der Verlust durch die erste Ursache ist unbedeutend, ausgenommen in den Fällen, in denen gekrümmte Speichen zu dem Zwecke verwendet werden, um den Anker als Gebläse wirken zu lassen; sogar dann ist der Verlust gering. Der Verlust aus der zweiten Ursache kann nicht vernachlässigt werden, bedingt aber selten die Erhöhung der Triebkraft um mehr als 1 oder 2 Proc. Der Verlust aus der dritten Ursache ist der bedeutendste, besonders bei grossen Maschinen. In allen bewegten Metallmassen, die magnetische Linien schneiden, treten, wenn die Metallmassen nicht geblättert sind, Wirbelströme auf. Treten magnetische Linien in die Welle ein, so kann sogar aus diesem Umstande ein Verlust entstehen. Die Art und Weise, wie man die einzelnen Verlustquellen untersucht, wird im Kapitel XXX: Prüfung von Dynamomaschinen und Elektromotoren, beschrieben werden. All diese Verluste bedingen die Vermehrung des Arbeitsverbrauchs; denn die aufgewendete Arbeit muss gleich der Summe der im Anker wirklich in elektrische Arbeit umgesetzten und der in der bezeichneten Weise nutzlos aufgewendeten Arbeit sein.

Wirkungsgrad von Dynamomaschinen (Stromerzeugern) und Elektromotoren.

Die Bezeichnung Wirkungsgrad wird in verschiedenem Sinne benutzt.

1. Wirkungsgrad der Umsetzung ist das Verhältniss zwischen der gesammten elektrischen, wirklich im Anker umgesetzten Leistung und der an die Welle der Maschine abgegebenen mechanischen Leistung. Gehen 12 Proc. der gesammten mechanischen Arbeit durch Reibung, Hysteresis und Wirbelströme verloren, so werden die verbleibenden 88 Proc. thatsächlich im Anker umgesetzt, wir berechnen deshalb den Wirkungsgrad der Umsetzung auf 88 Proc.
2. Elektrischer Wirkungsgrad oder ökonomischer Coëfficient oder Güteverhältniss heisst das Verhältniss zwischen der elektrischen Nutzleistung und der gesammten elektrischen Leistung oder der wirklich im Anker umgesetzten Leistung. Werden etwa in

einer Nebenschlussmaschine 3 Proc. der gesammten elektrischen Leistung zur Erwärmung des Ankerwiderstandes verbraucht und ferner 3 Proc. zur Aufrechterhaltung für den magnetisirenden Strom in der Nebenschlusswickelung, so beträgt die nutzbare elektrische Leistung nur 94 Proc. der gesammten elektrischen Leistung, das Güteverhältniss beträgt daher 94 Proc. Dieses Verhältniss ist nur vom Widerstande der Maschine abhängig. In neueren Maschinen kann es bis auf 97 Proc. steigen.

3. Der mechanische Wirkungsgrad ist das Verhältniss zwischen der nutzbaren elektrischen Leistung und der gesammten mechanischen, an die Welle abgegebenen Leistung. Dieses Verhältniss ist deshalb gleich dem Product aus dem Wirkungsgrad der Umsetzung mit dem Güteverhältniss. Nach dem angeführten Beispiele wäre das Verhältniss 94 Proc. von 88 Proc. oder 82,72 Proc.

Beziehungen der Grösse zur Leistungsfähigkeit und zum Wirkungsgrade.

Ein umfangreicher Streit hat sich über die Frage entsponnen, welche Beziehung zwischen den linearen Abmessungen gleichartiger Maschinen, ihrer zulässigen Nutzleistung und ihrem Wirkungsgrade besteht. Die abweichenden Ansichten rühren wesentlich von der Meinungsverschiedenheit bezüglich der Annahmen her, die von vornherein zu machen sind. Nur wenig steht hierüber zweifellos fest; so z. B., dass die Möglichkeit, die Magnetisirungsspulen von einer schädlichen Erwärmung frei zu halten, mit ihrer Oberfläche wächst. Ferner ist im Allgemeinen als sicher anzunehmen, dass die Umfangsgeschwindigkeit bei grossen und kleinen Maschinen nahezu gleich sein soll.

Die Frage ist u. A. von Hopkinson, Frölich, Ayrton, Mascart und Joubert, Kapp, Storch, Rechniewski, sowie von Pescetto erörtert worden.

Nach Hopkinson¹⁾ ist die Leistungsfähigkeit gleichartiger Maschinen der dritten Potenz ihrer linearen Abmessungen proportional; die zur Magnetisirung der Feldmagnete verbrauchte Arbeit ist den linearen Abmessungen proportional, während die zur Erhitzung der Ankerleiter verbrauchte Arbeit dem Quadrat der linearen Abmessungen proportional ist.

1) Proc. Inst. Civ. Engin. April 1883.

Mascart und Joubert¹⁾ betrachten die Leistungsfähigkeit als im Verhältnisse zum Quadrat der linearen Abmessungen stehend; nach ihnen sind kleinere Maschinen den grösseren vorzuziehen. Pescetto²⁾ gelangt zu gleichen Folgerungen.

Rechniewski³⁾ giebt wie Hopkinson das Verhältniss n^3 an; Frölich⁴⁾ bestimmt es zu n^4 . Letzterer kritisirt das von dem Verfasser dieses Werkes 1882 und von Deprez bestimmte Verhältniss n^5 , da es das Anwachsen des Stromes proportional n^3 voraussetzt, während dies nur proportional zu n^2 im Querschnitt der leitenden Drähte stattfindet; im Weiteren setze es voraus, dass die Stromdichte mit der Grösse der Maschine ansteigen müsse, was unthunlich sei.

Storch⁵⁾ unterscheidet bei Lösung der Aufgabe Maschinen für gleichbleibende Stromstärke von Gleichspannungsmaschinen. Unter der Annahme gleicher magnetischer Feldstärke, gleicher Umfangsgeschwindigkeit und gleicher zulässiger Stromdichte findet er, dass für alle Maschinen die zur Erregung nothwendigen Ampère-Windungen wie die linearen Abmessungen sich ändern. Für Maschinen mit gleichbleibender Stromstärke ist die Leistungsfähigkeit n^3 proportional, d. h. dem Gewichte der Maschine oder der Kupfermasse im Anker. Für Gleichspannungsmaschinen soll die gesammte Drahtlänge des Ankers unabhängig von den Abmessungen der Maschinen sein; die Zahl der äusseren Ankerleiter steht im umgekehrten Verhältniss zu den linearen Abmessungen; die Leistungsfähigkeit ändert sich im Verhältniss n^4 , jedoch unter übermässiger Erhitzung, wenn nicht die Kupfermasse des Ankers ebenfalls auf n^4 gebracht wird. Storch und Rechniewski stimmen mit Hopkinson darin überein, dass die in den Feldmagneten verbrauchte Arbeit im Vergleich zu der im Anker verbrauchten mit dem Anwachsen der linearen Abmessungen abnehme. Andererseits wächst bei Vergrösserung der bewegten Massen die Neigung, infolge der Wirbelströme einen Verlust zu verursachen.

Kapp⁶⁾ schlägt vor, die Umlaufgeschwindigkeit als im umgekehrten Verhältnisse zu den linearen Abmessungen sich ändernd

1) Leçons sur l'Électricité (1886), Bd. 2, S. 815.

2) L'Électricien, Bd. 11, S. 357. 1887.

3) La Lum. élect., Bd. 22, S. 311.

4) Die dynamoelektrische Maschine (1886), S. 168.

5) Centralblatt f. Elektrot., Bd. 8, S. 544, 594 und 743. 1886.

6) Proc. Inst. Civ. Engin., Bd. 83, S. 36. 1886.

anzunehmen, um alle Maschinen unter gleiche Bedingungen mit Rücksicht auf die Beanspruchung durch die Centrifugalkraft zu bringen, und alle ähnlichen Maschinen so zu betrachten, als ob die gleiche Sicherheitsgrenze der Erwärmung erreicht sei. Damit wird vorausgesetzt, dass die innere zur Erwärmung verbrauchte Arbeit proportional der Oberfläche ist oder wie $1:n^2$ sich verhält. Die magnetischen und elektrischen Widerstände der Feldmagnete sind proportional n^{-1} und die erregenden Kräfte proportional $n^{3/2}$, die Feldstärken proportional $n^{5/2}$, die elektromotorischen Kräfte proportional $n^{3/2}$ zu setzen. Die zulässigen Durchmesser der Drähte auf den Magneten sind zu n^1 und die im Anker zu $n^{3/2}$ angenommen; die Widerstände der Anker proportional zu n^{-2} und der zulässige Strom zu n^2 . Es folgt, dass die Leistungsfähigkeit der Maschinen (in Watt) wie $n^{3,5}$ und die verlorene Arbeit wie n^2 schwankt; der ökonomische Coëfficient (elektrisches Güteverhältniss) steigt daher mit der Grösse der Maschine. Kapp giebt die Kosten proportional zu $n^{2,5}$ an, woraus folgt, dass die Kosten einer Maschine für die Einheit der Leistung (z. B. für die Lampe) umgekehrt sich verhalten, wie die linearen Abmessungen. Er liefert zur Erläuterung folgende Zahlen:

Durchmesser des Ankers (in Centimetern)	25,4	38,1
Umdrehungen in der Minute	1000	670
Anzahl der Glühlampen	150	620
Gewicht (in Kilogramm)	508	1727
Preis (in Mark)	2040	4530
Auf eine Lampe entfallen (Mark)	13,6	9,08
Elektrisches Güteverhältniss (in Procent)	80	89

Ayrton¹⁾ nimmt an, dass die Geschwindigkeiten gleichartiger Maschinen umgekehrt proportional den Quadratwurzeln aus den linearen Abmessungen oder $n^{-1/2}$ anstatt n^{-1} gesetzt werden können, weil die Zahl und Stärke der Bindedrähte bei grösseren Maschinen leicht zu erhöhen sei. Bei den grösseren Maschinen lasse der erforderliche verhältnissmässig geringere Spielraum das Anwachsen des Stromes proportional n^2 zu. Dieser verstärkte Strom werde das Eisen verhältnissmässig stärker magnetisiren, und die elektromotorische Kraft werde höher als $n^{3/2}$, wahrscheinlich eher $n^{1,7}$ sein; dies erhöhe die Leistungsfähigkeit proportional $n^{3,7}$.

1) Proc. Inst. Civ. Engin., S. 116. 1886.

Die gewöhnliche Ansicht der Maschinen-Constructeure scheint dahin zu gehen, dass für gleichartige Maschinen das Verhältniss der Leistungsfähigkeiten etwas grösser als das Gewichtsverhältniss wird.

Esson¹⁾ hat die Frage in Betreff der vielpoligen Maschinen erörtert und sieht es als eine Frage zweckmässiger Bauart an, ob der Wirkungsgrad anwächst oder abnimmt, wenn die Maschinen grösser gebaut werden. Er behauptet ferner, dass, wenn alle linearen Abmessungen vergrössert werden, eine erhebliche Neigung zur Funkenbildung und somit ein Herabsinken der Nutzleistung eintritt. Er schloss daraus, dass die Nutzleistung nicht proportional dem Gewicht, d. i. n^3 , steigt, wofern nicht mit der Grösse der Maschinen auch die Umfangsgeschwindigkeit etwas vermehrt wird.

1) Journ. Inst. Electr. Engin., Bd. 19, S. 164. 1890 und Bd. 20, S. 265. 1891.

Kapitel VI.

Gesetze des Magnetismus, magnetische Eigenschaften des Eisens.

Da alle dynamoelektrischen Maschinen in ihrer Wirksamkeit auf magnetischen Vorgängen beruhen, so ist ein volles Verständniss der magnetischen Gesetze erforderlich. Die Kenntniss der Beziehungen zwischen dem erregenden Strome und dem durch diesen erregten Magnetismus setzt uns in den Stand, eine Dynamomaschine zu entwerfen; denn diese Kenntniss ermöglicht die Berechnung der Grösse des Feldmagnetes, der Stärke und Zahl der Windungen, welche die Maschine zu einer bestimmten Leistung geeignet machen. Zunächst werden verschiedene Begriffserklärungen nothwendig, dann soll eine Uebersicht über die Thatsachen, welche auf den magnetischen Kreis Bezug haben, sowie über die Eigenschaften verschiedener Eisen- und Stahlsorten gegeben werden. Im Kapitel VII folgen die Methoden zur Berechnung des Widerstandes des magnetischen Kreises, ferner Beispiele und zweckmässige Vorschriften. Endlich sollen die den Feldmagneten gegebenen verschiedenen Formen einer Besprechung unterzogen werden.

Begriffserklärungen und allgemeine Eigenschaften.

Magnetischer Einheitspol. Der magnetische Einheitspol ist ein solcher, welcher einen gleichnamigen und gleich starken Pol im Abstände von 1 cm (in der Luft) mit der Kraft von 1 Dyn abstösst.

Magnetische Feldstärke. Im Kapitel III wurde erläutert, dass jeder Magnet von einem »Felde« umgeben wird, in dessen Bereiche man die magnetische Kraft beobachtet. Durch eine Messung der Grösse und der Richtung jener Kraft, d. h. durch Bestimmung der Feldstärke und der Richtung der Kraftlinien

können wir in jedem beliebigen Punkte die Beschaffenheit des Feldes nachweisen.

Die Feldstärke in einem Punkte wird durch die Kraft gemessen, mit der das Feld auf die Einheit der magnetischen Polstärke in jenem Punkte einwirkt. Die Einheit der Feldstärke ist daher diejenige, die mit der Kraft einer Dyne auf die Poleinheit wirkt.

Hieraus geht hervor, dass in dem Abstände eines Centimeters von dem Pole eines Magnetes mit der Stärke »eins« das Feld die Stärke »eins« besitzt. — Nehmen wir einen Magnetpol von der Stärke m und bringen ihn in einen Punkt eines Feldes, wo die Feldstärke \mathfrak{H} herrscht, so wird die Kraft m mal so gross sein, als wenn der Pol die Stärke »eins« besässe. Die Kraft (in Dynen) wird dann durch Multiplication der Polstärke und der Feldstärke erhalten, so dass

$$f = m \times \mathfrak{H}.$$

Magnetische Linien. In jedem magnetischen Felde lässt sich durch irgend einen gegebenen Punkt eine Linie in solcher Richtung ziehen, dass sie die Richtung der magnetischen Kraft in dem betrachteten Punkte angiebt (Fig. 10, S. 26). Die Curven, die man unter Zuhilfenahme von Eisenfeilspänen bei Magneten erhält, ergeben die Gestalt der unsichtbaren magnetischen Linien. Wenn solche Linien auch nicht wirklich vorhanden sind, so dürfen wir sie doch voraussetzen, wir dürfen annehmen, dass der gesammte Raum des magnetischen Feldes von solchen Linien durchsetzt ist. Faraday war der erste, der dem Begriffe der magnetischen Linien eine quantitative Bedeutung gegeben hat. Es lässt sich mittels derselben nicht allein die Richtung, sondern auch die Grösse der magnetischen Kräfte in folgender Weise bezeichnen: Zieht man ebenso viele Linien auf das Quadratcentimeter des Feldquerschnittes, wie Dynen (für die Poleinheit) an dem betreffenden Punkte wirksam sind, so bedeutet das Zeichen \mathfrak{H} entweder die Zahl der Dynen auf eine Poleinheit oder die Zahl der Linien auf das Quadratcentimeter Querschnitt der Luft, oder auch die Grösse der magnetomotorischen Kraft, welche auf die Längeneinheit des Feldes wirkt.

Die Vorstellung der magnetischen Linien setzt uns nun auch in den Stand, klarer zu erkennen, was unter magnetischer Strömung zu verstehen ist; denn wir sehen in Fig. 10 die Linien von dem einen Pol des Magnets wie einen Strom ausgehen, den umgebenden Raum ausfüllen und zum anderen Pol hinfliessen. Gleichwie die Gesammtzahl der Stromlinien einer Flüssigkeit auf dem ganzen Wege dieselbe bleibt, so bleibt auch die Gesammtzahl der magnetischen

Linien, welche durch irgend einen Querschnitt des magnetischen Feldes gehen, immer dieselbe, vorausgesetzt, dass der Schnitt quer durch das ganze Feld geht. Diese Gesamtzahl nennen wir die magnetische Strömung und bezeichnen sie mit \mathcal{S} .

In Fig. 10 verlaufen die Linien durch den Stabmagnet hin und durch den umgebenden Raum zurück, sie bilden so einen vollständigen magnetischen Kreis. Werden die Enden des Stabes rund gebogen und miteinander verbunden, so dass ein vollständig geschlossener Ring entsteht, so verlaufen die magnetischen Linien sämtlich im Eisen des Magnetes, in die umgebende Luft treten keine aus. Wir bezeichnen einen solchen Ring als einen vollständig geschlossenen magnetischen Kreis. Bei den Dynamomaschinen suchen wir diesen metallischen Schluss des Kreises so weit zu erreichen, als es die Rücksicht auf die Beweglichkeit der sich drehenden Theile irgend zulässt.

Obwohl der Begriff von magnetischen Linien in der Luft verbunden ist mit der Vorstellung, dass jene eine Kraft auf einen magnetischen Pol ausüben, so ist es doch viel weniger diese Eigenschaft, welche uns bei der Betrachtung von Dynamomaschinen interessirt, als jene andere, vermöge deren in einem quer zur Richtung der Linien bewegten Leiter eine elektromotorische Kraft inducirt wird.

Obwohl wir vorher die magnetischen Linien als ununterbrochen fortlaufend in dem ganzen Kreise bezeichnet haben, so trifft dies doch genau genommen nur insofern zu, als ihre Eigenschaft, eine elektromotorische Kraft zu erzeugen, in Betracht kommt; denn die Kraft innerhalb eines magnetischen Materiales wie Eisen wird nicht durch die Zahl der magnetischen Linien auf das Quadratcentimeter dargestellt, wie später bei der Betrachtung der magnetomotorischen Kraft gezeigt werden wird; nur in der Luft und gleich unmagnetischen Substanzen wird die Kraft dargestellt durch die Zahl der Linien auf das Quadratcentimeter. Wir wollen daher die Bezeichnung »magnetische Linien« nur dann anwenden, wenn es sich um die Strömung in einem magnetischen Material handelt, dagegen »Kraftlinien« diejenigen Linien nennen, welche in die Luft austreten. Beide verlaufen im magnetischen Kreis ohne Unterbrechung, und in der Luft werden die magnetischen Linien zu Kraftlinien. Wo die Linien, welche Richtung und Werth irgend einer Vectorgrösse darstellen, wie z. B. magnetische Linien oder elektrische Stromfäden, in sich selbst geschlossen sind, sagt man, die Vectorgrösse bilde einen Kreislauf.

Die Zahl der in einem Quadratcentimeter Querschnitt eines magnetischen Materials vorhandenen magnetischen Linien nennen wir magnetische Stromdichte und bezeichnen sie mit dem Buchstaben \mathfrak{B} . Die magnetische Kraft wird wie vorher mit \mathfrak{H} bezeichnet, worunter aber die Zahl der Krafflinien zu verstehen ist, die in dem Raume vorhanden sein würde, wenn das magnetische Material durch Luft ersetzt wäre und dieselben Umstände, welche die Magnetisirung bewirkten, noch fort dauerten.

Die Vorstellung vom magnetischen Kreise war mehr oder weniger Ritchie¹⁾, Sturgeon²⁾, Dove³⁾, Dub⁴⁾ und De la Rive⁵⁾ geläufig; der letztere gebraucht ausdrücklich die Bezeichnung »ein geschlossener magnetischer Kreis«. Joule⁶⁾ fand, dass die Maximalkraft eines Elektromagnetes »der kleinsten Schnittfläche des gesammten magnetischen Kreises« proportional sei; er betrachtete den der Induction entgegenstehenden Widerstand als proportional der Länge des magnetischen Kreises. Faraday⁷⁾ hielt den Beweis für erbracht, dass jede magnetische Linie eine geschlossene Curve bildet; dass der Weg dieser geschlossenen Curven von der magnetischen Leitungsfähigkeit der benachbarten Massen abhängt; dass man die magnetischen Linien genau so wie die elektrischen Strömungslinien in einem geschlossenen Kreise ansehen könne. Nach seiner Ansicht verhielt sich ein von Luft umgebener Magnet wie eine in Wasser eingetauchte Volta-Batterie. Er erkannte sogar das Vorhandensein einer der elektromotorischen Kraft in einem Stromkreise ähnlichen Kraft, wenn auch die Bezeichnung »magnetomotorische Kraft« neueren Ursprunges ist. Dieselbe Vorstellung wird mehr oder minder in der letzten Hälfte der Abhandlungen über Magnetismus von Lord Kelvin in der zweiten Hälfte des Sammelbandes über Elektrostatik und Magnetismus anerkannt. Rowland⁸⁾ wendete die Schlussfolgerungen und die Bezeichnung von Faraday bei der Bearbeitung

1) Phil. Mag. Ser. 3, Bd. 3, S. 122.

2) Ann. of El., Bd. 12, S. 217.

3) Pogg. Ann., Bd. 29, S. 462. 1833. Vergl. auch Bd. 43, S. 517. 1838.

4) Dub, Elektromagnetismus (1861), S. 401 und Pogg. Ann., Bd. 90, S. 440. 1853.

5) De la Rive, Treatise on Electricity (Walker's translation), Bd. 1, S. 292.

6) Ann. of Electric., Bd. 4, S. 59. 1839; Bd. 5, S. 195. 1841; und Scientif.

Papers, S. 8, 34, 35, 36.

7) Experim. Researches, Bd. 3, Art. 3117, 3228, 3230, 3260, 3271, 3276, 3294 und 3361.

8) Phil. Mag., Ser. 4, Bd. 46. August 1873. „On Magnetic Permeability and the Maximum of Magnetism of Iron, Steel and Nickel“.

einiger neueren Ergebnisse über magnetische Durchlässigkeit ausdrücklich an; er führte aus, dass die Strömung der magnetischen Kraftlinien durch einen Stab hindurch einer genauen Berechnung unterworfen werden könne. Das elementare Gesetz, sagt er, gleicht dem Gesetze von Ohm. Bezeichnen wir mit \mathfrak{R} den Widerstand, den die Kraftlinien zu überwinden haben, mit \mathfrak{F} die magnetisirende Kraft der Spule und mit \mathfrak{S} die Zahl der Kraftlinien an irgend einem Punkte des Stabes, so sollte für einen besonderen Fall (Ringmagnet, also vollständig geschlossener Kreis) die Gleichung

$$\mathfrak{S} = \frac{\mathfrak{F}}{\mathfrak{R}}$$

gelten. Diese Gleichung des magnetischen Kreises wird Jeder als eine dem Ohm'schen Gesetze ähnliche Gleichung ansehen. Rowland wendete die Berechnungen zur Bestimmung der Durchlässigkeit gewisser Proben von Eisen, Stahl und Nickel an.

In den Jahren 1882¹⁾ und 1883 entwickelte Bosanquet²⁾ Aehnliches in ausführlicherer Darstellung und wendete den sehr passenden Ausdruck »Magnetomotorische Kraft« an. Damit wird diejenige Kraft bezeichnet, welche die magnetischen Linien der Induction durch den magnetischen Widerstand des Kreises zu treiben bestrebt ist. In diesen Abhandlungen werden die Berechnungen systematisch durchgeführt und behandeln nicht allein die besonderen Eigenschaften des Eisens, sondern auch Aufgaben, die sich aus der Gestalt des Eisens ergeben. Bosanquet weist nach, wie man die verschiedenen Widerstände der einzelnen Theile des Kreises berechnet und durch Addition derselben den gesammten Widerstand des magnetischen Kreises erhält.

Im Jahre 1886 führte Gisbert Kapp³⁾, und unabhängig von ihm J. und E. Hopkinson⁴⁾, den Begriff des magnetischen Kreises bei der Berechnung von dynamoelektrischen Maschinen ein. Wir werden diese Methoden im nächsten Kapitel kennen lernen.

1) Proc. Roy. Soc., Bd. 34, S. 445. Dez. 1882.

2) Phil. Mag., Ser. 5, Bd. 25, S. 205. März 1883. „On Magneto-motive Force“. Ebenda Bd. 9. Februar 1885, und Proc. Roy. Soc., Nr. 23. 1883. Vergl. auch Electrician, Bd. 14, S. 291. 14. Februar 1885.

3) Journ. Soc. Telegr. Eng. and Electr., Bd. 25, S. 524 bis 529. 11. Nov. 1886. „On the Predetermination of the Characteristics of Dynamos“; eine sehr werthvolle Abhandlung, durch Anwendung gemischter Einheiten indessen im Werthe beeinträchtigt.

4) Phil. Trans. 1886, Theil 1, S. 331.

Wir sahen, dass \mathcal{E} , die magnetische Strömung von einem Pole zum anderen, eine wichtige Grösse für die Bestimmung der elektromotorischen Kraft einer Dynamomaschine ist. Da diese Strömung abhängig ist von der magnetomotorischen Kraft und dem Widerstande des magnetischen Kreises, müssen wir diese beiden Grössen einer näheren Betrachtung unterziehen.

Magnetomotorische Kraft

oder gesammte magnetisirende Kraft eines in einer Wicklung kreisenden elektrischen Stromes.

Wenn ein Strom durch einen in mehreren Windungen um einen Kern gelegten Draht (Fig. 82) fliesst und in dieser Weise auf einen inneren magnetischen Kreis einwirkt, so ist die magnetisirende Kraft sowohl der Stromstärke als auch der Zahl der Windungen der Wicklung proportional. Die magnetisirende Kraft ist unabhängig von der Stärke und dem Materiale des Drahtes oder von dessen Gestalt; sie bleibt gleich, ob die Windungen dicht zusammen oder weit auseinander liegen. Bezeichnet N die Zahl der Windungen der Spule und i die Stromstärke in Ampère, so liefert das Product die Zahl der Ampère-Windungen. Man kann durch einen Versuch nachweisen, dass 20 Ampère, die durch fünf Windungen fließen, die gleiche magnetisirende Kraft hervorbringen, wie 1 Ampère, das 100 mal, oder wie 100 Ampère, die einmal um den Kern fließen.

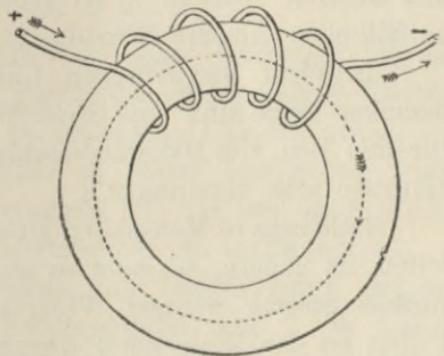


Fig. 82. Magnetisirende Wicklung um einen magnetischen Kreis.

In jedem dieser Fälle erhält man 100 Ampère-Windungen. Um hieraus den Werth für die magnetomotorische Kraft in absoluten C.G.S.-Einheiten zu berechnen, hat man die Ampère-Windungen mit $\frac{4}{10}\pi$ oder mit 1,257 zu multipliciren. Demnach besteht die Beziehung:

$$\text{Magnetomotorische Kraft} = 1,257 N i.$$

Der Zahlenfactor lässt sich entbehren, wenn man die Ampère-Windungen selbst als magnetomotorische Kraft betrachtet; in diesem Falle wendet man einen Coëfficienten für die Berechnung des Widerstandes des magnetischen Kreises an.

Die magnetomotorische Kraft wird auch von einigen Autoren¹⁾ als »Linienintegral der magnetischen Kräfte« bezeichnet, und zwar aus folgendem Grunde: In einem Felde von der Stärke \mathfrak{H} ruft ein magnetischer Einheitspol eine Kraft hervor, die numerisch gleich \mathfrak{H} ist; wenn der Einheitspol entgegen dieser Kraft einmal längs eines geschlossenen Weges (wie die punktirte Linie in Fig. 82) bewegt würde, so wäre die geleistete Arbeit gleich der magnetischen Kraft mal dem Integral des Weges. Daher ist die magnetomotorische Kraft auf einem Wege von der Länge l in einem Felde von der Stärke \mathfrak{H} gleich $\mathfrak{H}l$. Die Feldstärke einer regelmässig gewickelten Rolle wird daher bestimmt aus der Formel

$$\mathfrak{H} = \frac{1,257 Ni}{l};$$

mit anderen Worten: \mathfrak{H} ist proportional den auf die Längeneinheit entfallenden Ampère-Windungen.

Zwischen magnetischen und elektrischen Strömen besteht in mancher Beziehung eine Gleichförmigkeit, welche die Darlegung der für den Bau von Dynamomaschinen so wichtigen magnetischen Verhältnisse sehr vereinfacht²⁾.

Gleichwie es Materialien giebt, die den elektrischen Strom besser leiten als andere, so giebt es auch Materialien, welche dem magnetischen Strome weniger Widerstand bieten als andere. In beiden Fällen ist der Widerstand direct proportional der Länge des Weges und dem specifischen Widerstande des Materials, und umgekehrt proportional dem Querschnitt des Leiters. Wie die gesammte elektromotorische Kraft einer Batterie gleich ist der Summe der elektromotorischen Kräfte der einzelnen hintereinander geschalteten Elemente, so ist auch die gesammte magnetomotorische Kraft eines magnetischen Kreises gleich der Summe der magnetomotorischen Kräfte der einzelnen Drahtrollen. Wenn der magnetische Kreis verzweigt ist (wie bei den in Fig. 101, Nr. 24 dargestellten Manchester-

1) Vergl. Maxwell's Electricity and Magnetism, Bd. II, Art. 499; oder S. P. Thompson's Elementary Lessons on Electricity and Magnetism (Ausgabe 1895. S. 334).

2) Es ist jedoch nicht ausser Acht zu lassen, dass, wenn wir auch zum Zwecke der Vereinfachung diese Parallele zwischen einem magnetischen und einem elektrischen Kreise ziehen dürfen, zwischen beiden doch der grosse Unterschied besteht, dass in einem elektrischen Kreise beständig von einem Punkte des Kreises zum anderen Energie übergeführt wird, in einem magnetischen jedoch nicht; Leiter des Magnetismus in dem Sinne, dass sie durch „freien Magnetismus“ Energie fortzuleiten im Stande wären, kennen wir noch nicht.

Dynamomaschinen), summiren sich nicht die Kräfte der verschiedenen Rollen, sondern sie sind parallel geschalteten Batterien zu vergleichen.

Wir finden eine magnetische Potentialdifferenz zwischen den Enden des mit einer magnetisirenden Rolle bewickelten Magnetkernes, wie wir eine elektrische Potentialdifferenz zwischen den Polklemmen eines Elementes haben. Von einem Punkte eines magnetischen Kreises zu einem andern fällt das Potential um einen Betrag, der gleich ist dem Widerstand des Weges multiplicirt mit der Gesamtströmung. Man kann sagen, dass Eisen innerhalb einer Magnetisierungsrolle den Zweck hat, den »innern« Widerstand zu vermindern. Wir verwenden starke Eisenkerne bei unsern Dynamomaschinen, damit die magnetische Spannung ohne grossen Verlust auf den Anker übertragen wird.

Das magnetische Potentialgefälle in einer Luftsäule ist auf das Centimeter Länge numerisch gleich der magnetischen Dichte. Um die magnetomotorische Kraft zu bestimmen, welche nöthig ist, um eine gewisse magnetische Dichte in einem bestimmten Luftzwischenraume hervorzubringen, brauchen wir nur die magnetische Dichte mit der Länge des Luftzwischenraumes zu multipliciren.

Um also eine magnetische Dichte von 10000 Linien auf das Quadratcentimeter in einem Luftzwischenraum von 1 cm Länge hervorzubringen, ist eine magnetomotorische Kraft von 10000 erforderlich, wenn wir als Einheit die magnetomotorische Kraft ansehen, welche im Stande ist, die Einheit der magnetischen Dichte in einem Luftzwischenraum von 1 cm Länge zu erzeugen. Da 1 Ampère-Windung eine magnetomotorische Kraft von 1,257 hervorbringt, so sind zur Erzeugung der magnetischen Dichte von 10000 Linien in einem Luftraume von 1 cm Länge $\frac{10000}{1,257}$ $\approx \sim 8000$ Ampère-Windungen erforderlich. Wir könnten daher die zur Erregung der Feldmagnete einer Dynamomaschine erforderliche Zahl von Ampère-Windungen berechnen, indem wir die magnetische Dichte mit der Gesamtlänge des Luftzwischenraumes multipliciren und mit 1,257 dividiren, wobei noch einige Windungen zuzugeben sind, um das Sinken des magnetischen Potentials im Eisenkreis auszugleichen; es ist indessen gebräuchlicher, den gesammten Widerstand des Kreises zu ermitteln und ihn mit der Gesamtströmung zu multipliciren, wie das in den Kapiteln VII und XVI gezeigt werden wird.

Widerstand des magnetischen Kreises.

Wir sahen früher, dass unter sonst gleichen Umständen der gesammte magnetische Strom in einem Kreise umgekehrt proportional ist dem specifischen Widerstand des Materials, aus dem er besteht, oder direct proportional der Durchlässigkeit, d. i. dem reciproken Werth des specifischen Widerstandes.

Die Durchlässigkeit eines Materials ist diejenige Zahl, welche das Verhältniss der magnetischen Dichte \mathfrak{B} zur magnetischen Kraft \mathfrak{H} angiebt¹⁾. Wenn z. B. eine Luftsäule einer magnetischen Kraft \mathfrak{H} ausgesetzt ist, so ist die magnetische Dichte \mathfrak{B} gleich \mathfrak{H} ; das Verhältniss $\mathfrak{B}/\mathfrak{H}$ ist also gleich 1, d. h. die Durchlässigkeit der Luft ist 1.

Wenn wir ein Stück Eisen nehmen und unterwerfen es derselben magnetischen Kraft \mathfrak{H} , so finden wir, dass \mathfrak{B} viel grösser ist. Wurde z. B. eine bestimmte Eisensorte einer magnetischen Kraft ausgesetzt, die 50 magnetische Linien auf das Quadratcentimeter in der Luft erzeugen kann, so fand man, dass das Eisen von nicht weniger als 16062 magnetischen Linien auf das Quadratcentimeter durchdrungen wurde. Die Durchlässigkeit war also $16062 : 50 = 321$, d. h. die Durchlässigkeit des Eisens war 321 mal so gross als die der Luft. Die Durchlässigkeit unmagnetischer Körper, als Seide, Baumwolle und anderer Isolatoren, ebenso von Messing, Kupfer und aller unmagnetischen Metalle, wird $= 1$ gesetzt. Praktisch ist die Durchlässigkeit die gleiche wie für Luft.

Die Durchlässigkeit des Eisens ist aber sehr verschieden, je nach dem Grade der Magnetisirung. Bei allen Eisensorten nimmt die Magnetisirbarkeit nach Erreichung einer gewissen Grösse der Magnetisirung ab; mit anderen Worten, wenn ein Stück Eisen bis zu einem gewissen Grade magnetisirt ist, wird es von diesem Augenblicke ab weniger durchlässig gegenüber einer Steigerung der Magnetisirung, und obwohl eine thatsächliche Sättigung nicht erreicht wird, tritt doch eine praktische Grenze ein, über welche hinaus eine

1) Für diese drei Begriffe sind folgende Bezeichnungen gebräuchlich:

\mathfrak{B} : Zahl der magnetischen Linien auf 1 Quadratecentimeter Querschnitt des Materials. Magnetische Stromdichte, magnetische Dichte. Innere Magnetisirung. Magnetische Induction. Induction. Stärke der Induction.

\mathfrak{H} : Zahl der Kraftlinien auf 1 Quadratcentimeter, welche in Luft vorhanden sein würden. Magnetische Kraft an einem Punkte. Stärke der magnetischen Kraft. Gefälle des magnetischen Potentials für 1 cm. Magnetisirende oder magneto-motorische Kraft auf die Einheit der Länge der Kraftlinien.

μ : Magnetische Durchlässigkeit (Permeabilität). Specifisches Leitungsvermögen für magnetische Linien. Magnetisches Vervielfältigungsvermögen des Materials.

stärkere Magnetisirung nicht gut erreicht werden kann. Joule war einer der Ersten, der diese Neigung zur magnetischen Sättigung feststellte. Neuere Untersuchungen haben numerisch erwiesen, wie die Durchlässigkeit gegenüber höheren Graden der Magnetisirung abnimmt. Die praktische Grenze der Magnetisirung \mathfrak{B} bei gutem Schmiedeeisen liegt bei ungefähr 20000 magnetischen Linien auf das Quadratcentimeter, bei Gusseisen ist dieser Werth ungefähr gleich 12000.

Ehe man bei der Construction eines Elektromagnetes die Grösse des zum Kern erforderlichen Eisenstückes berechnen kann, muss man die Eigenschaften des Eisenstückes kennen. Denn wenn das Eisen eine geringe magnetische Durchlässigkeit besitzt, so braucht man zur Erreichung derselben magnetischen Wirkung ein dickeres Stück, als wenn die Durchlässigkeit grösser ist. Andererseits würde ein Stück von geringer Durchlässigkeit mehr Kupferdraht zur Wickelung erfordern; denn um die Magnetisirung auf den gewünschten Grad zu steigern, müsste man grössere magnetisirende Kraft anwenden, als wenn ein Stück von höherer Durchlässigkeit genommen worden wäre.

Curven der Magnetisirung.

Um in bequemer Weise die magnetischen Eigenschaften einer Eisensorte übersehen zu können, zeichnet man eine Magnetisirungscurve auf, d. h. eine Curve, deren Abscissen die magnetische Kraft \mathfrak{H} darstellen, und deren Ordinaten die zugehörige Magnetisirung \mathfrak{B} ausdrücken.

Hopkinson hat 35 verschiedene Eisensorten von bekannter chemischer Beschaffenheit geprüft. Die wichtigsten Sorten waren ein ausgeglühtes Schmiedeeisen und ein graues Gusseisen, die von Mather und Platt bei Herstellung von Dynamomaschinen verwendet werden. Hopkinson hat die Ergebnisse in Curven dargestellt; aus diesen lassen sich für künftige Berechnungen mit genügender Genauigkeit numerische Werthe entnehmen.

Die obere Curve der Fig. 83 zeigt das Verhalten von ausgeglühtem Schmiedeeisen¹⁾. Die aufsteigende Linie giebt die Beziehung zwischen der Grösse der magnetischen Kraft \mathfrak{H} und der magnetischen Induction \mathfrak{B} an, während \mathfrak{H} von 0 bis 220 stieg; die absteigende Linie giebt dieselbe Beziehung während der Abnahme der magnetischen Kraft \mathfrak{H} bis 0 und während ihrer Umkehrung bis zur Vernichtung des magnetischen Rückstandes. Die untere Curve zeigt das Verhalten von grauem Gusseisen.

1) Hopkinson, Phil. Transact. 1885, Th. II, S. 455.

Wenn ein frisches Eisen- oder Stahlstück der allmählich steigenden Magnetisirungskraft unterworfen wird, so bemerkt man, dass der unterste, in der Nähe des Anfangspunktes befindliche Theil der Curve leicht concav ist (vergl. Fig. 83). Es deutet dies auf einen gewissen Zustand, in dem bei geringer magnetischer Kraft die Durchlässigkeit grösser als im anfänglichen (unmagne-

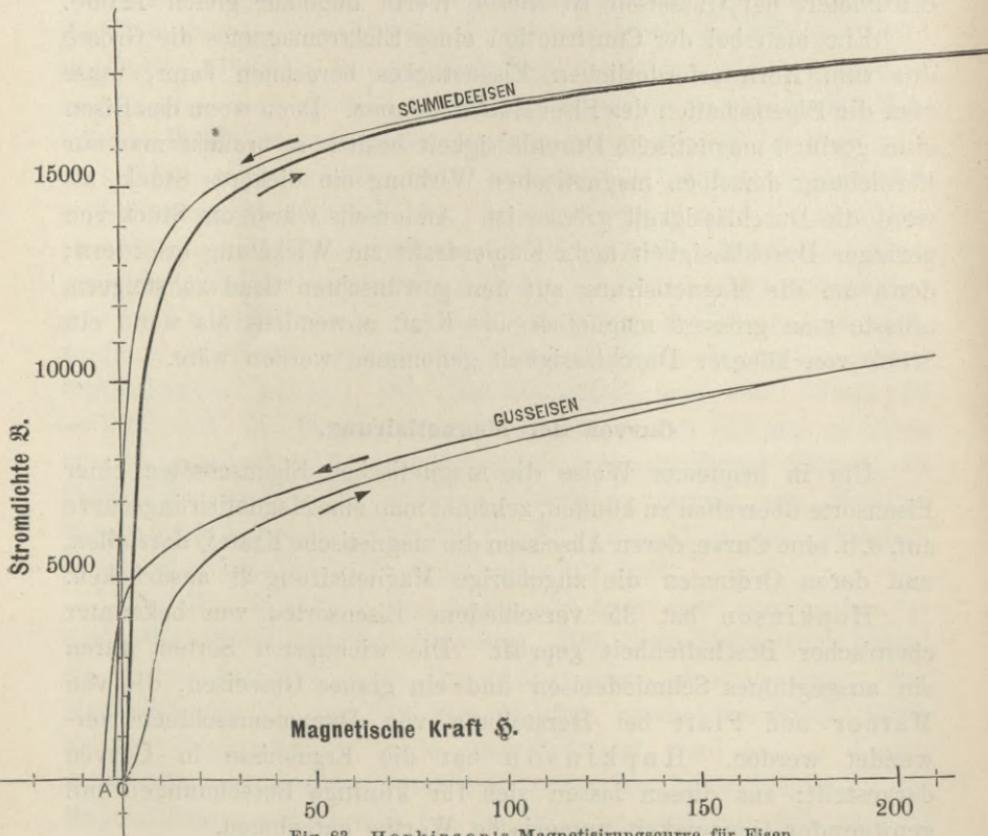


Fig. 88. Hopkinson's Magnetisierungscurve für Eisen.

tischen) Zustand ist. Bei hartem Eisen und bei Stahl prägt sich der concave Theil deutlicher aus als bei weichem Eisen. Im Einzelnen treten in den Curven sogar bei verschiedenen Probestücken derselben Eisensorte Unterschiede hervor.

Bei der Construction von Dynamomaschinen ist es bequem, auf eine Reihe solcher Curven, wie sie in Fig. 84 dargestellt sind, zurückzugreifen. Dieselben müssen durch sorgfältige Untersuchung von Proben des Eisens, das man zu verwenden gedenkt, gewonnen

werden. In Fig. 84 sind sieben Curven dargestellt, welche sich auf weiches Eisen, gehärtetes Eisen, Flusseisen, ausgeglühten Stahl, hart gezogenen Stahl, glasharten Stahl und Gusseisen beziehen.

Wenn wir die Durchlässigkeit $\mathfrak{B}/\mathfrak{H}$, oder μ , wie sie gewöhnlich bezeichnet wird, als Ordinate und \mathfrak{B} als Abscisse auftragen, haben wir die Beziehungen Beider in einer für die Ermittlung magnetischer Widerstände bequemeren Form. Fig. 85 zeigt auf diese Weise hergestellte Curven der Durchlässigkeit für verschiedene Stahl- und Eisensorten. Für die gleichen und einige andere Sorten findet man einige andere magnetische Grössen in der folgenden Tabelle; es sind dies 1. zusammengehörige Werthe von \mathfrak{B} und \mathfrak{H} für auf- und absteigende Magnetisirung, wonach es leicht ist, Curven von der Art der Fig. 83 zu zeichnen; 2. Werthe des Rückstandes oder der Remanenz R , der Coërcitivkraft C und der Hysteresis H , die auf Seite 124 und 126 näher erläutert werden.

Wir sehen, dass die Durchlässigkeit des schwedischen Eisens bei geringen magnetischen Dichten nicht

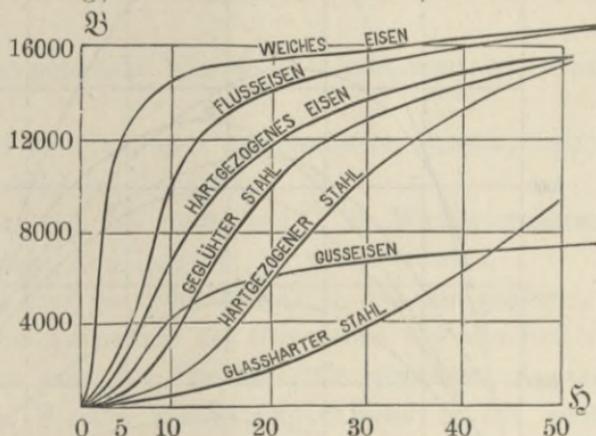


Fig. 84. Magnetisierungscurven für verschiedene Eisen- und Stahlsorten.

sehr bedeutend ist, aber bei grösseren Dichten bis zu 7000 sehr erheblich zunimmt. Eine weitere Zunahme von \mathfrak{B} vermindert wieder die Durchlässigkeit, sie fällt auf 300 bei $\mathfrak{B} = 16000$, und auf etwa 100 bei $\mathfrak{B} = 18000$. Es ist also nicht vortheilhaft, \mathfrak{B} über 16000 hinaus zu steigern. In den Feldmagneten der Dynamomaschinen ist \mathfrak{B} gewöhnlich ungefähr $= 16000$, so dass die Durchlässigkeit des Materials bei diesem Werthe von \mathfrak{B} einen Maassstab für den Werth der verschiedenen für Feldmagnete von Dynamomaschinen in Betracht kommenden Materialien abgibt. Nun zeigt uns ein Blick auf die Curve Nr. 3 in Fig. 85, dass das Flusseisen, obwohl seine Durchlässigkeit für Stromdichten unter 10000 viel geringer ist als die Durchlässigkeit des schwedischen Eisens, doch bei hohen Stromdichten ebenso gut oder sogar besser als letzteres ist. Da es billiger ist, hat seine Verwendung im Dynamomaschinenbau

sehr zugenommen¹⁾, um so mehr, als es sich giessen und leicht bearbeiten lässt und somit die Herstellung der Maschinengestelle sehr erleichtert. Der deutsche »Dynamostahl«, ein Gussstahl, ist dem Flussstahl in seinen magnetischen Eigenschaften überlegen, wie die Curven 4, 5 und 6 und die Zahlen der Tabelle zeigen. Mitismetall, welches als gegossenes Schmiedeeisen bezeichnet werden kann, insofern als es ein Schmiedeeisen ist, welches durch einen

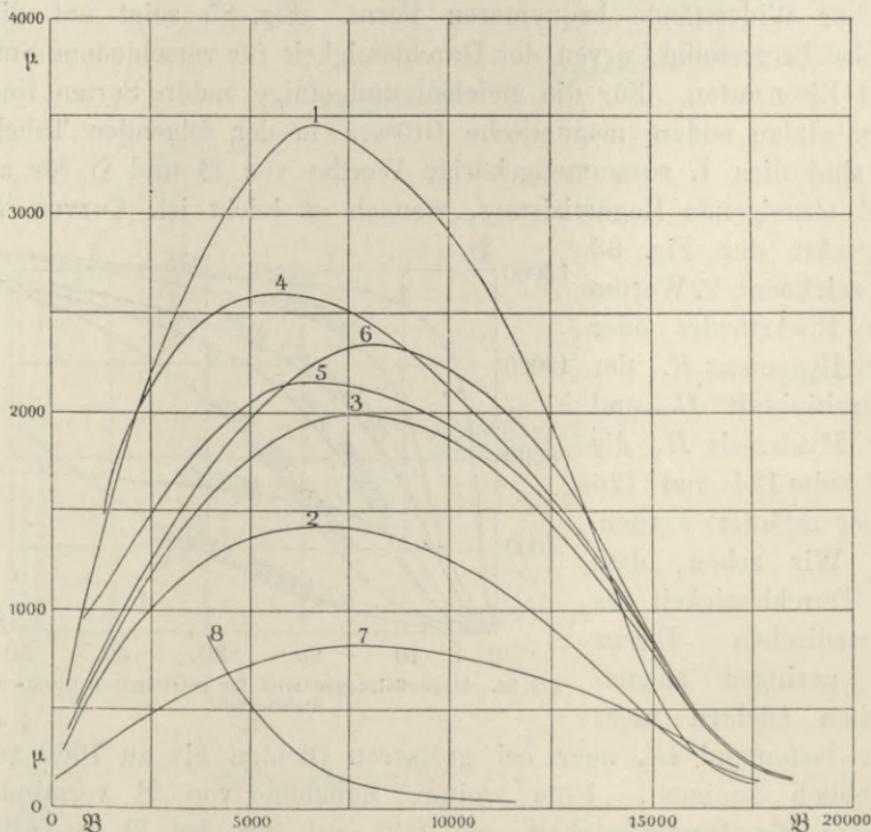


Fig. 85. Durchlässigkeit verschiedener Eisensorten.

geringen Aluminiumzusatz schmelzbar gemacht wird, ist nach des Verfassers Ermittlungen magnetisirungsfähiger als Gusseisen und steht dem besten Schmiedeeisen nicht viel nach.

Durch Hämmern, Walzen, Abschrecken oder irgend einen Process, der Eisen härter und dichter macht, wird die Durchlässigkeit verringert, diese Verringerung kann aber durch Erhitzen bis zur

1) Weitere Angaben über weiches Flusseisen und Mitismetall finden sich bei Henrard, La Lumière Electrique, Bd. 33, S. 595; ferner bei Thompson, Knight und Bacon, Amer. Inst. Elect. Eng., Bd. 9, vom 7. Juni 1892.

Rothgluth und nachheriges langsames Abkühlen wieder aufgehoben werden. Dies zeigt sich in den Curven 4 bis 7.

Magnetische Eigenschaften
der wichtigsten, für den Bau von Dynamomaschinen
gebrauchten Eisen- und Stahlarten¹⁾.

Bedeutung der Abkürzungen:

(Die vorgesetzten Cursivzahlen bedeuten die Curven in Fig. 85.)

- (1) Schwed. aus Schweden bezogenes »Schwedisches Eisen«.
 (2) Schmied. Schmiedeeisen der Friedrichs-Wilhelmshütte in Troisdorf.
 (3) Fluss. Flusseisen der Gutehoffnungshütte in Oberhausen.
 (4—7) Krupp Dynamostahl-Façonguss der Gusstahlfabrik Fried.
 Krupp in Essen.

Gruson Dynamostahl von Otto Gruson & Co., Magdeburg-Buckau.

Oeking Dynamostahl von Oeking & Co., Düsseldorf-Lierenfeld.

- (8) Gusseisen.

Die vier Sorten Dynamostahl von Krupp stammten aus demselben Guss; es wurden

- Nr. 4 gegossen, geglüht und gedreht, gewöhnlicher Stahlfaçonguss,
 » 5 gegossen, geschmiedet und gedreht,
 » 6 gegossen, geglüht und bei 900 Grad C. in Wasser gehärtet,
 darauf nachgeglüht und langsam in Asche erkaltet,
 » 7 gegossen, geglüht und bei 900 Grad C. in Wasser gehärtet.

Die Proben sind mit Ausnahme des Gusseisens von der Reichsanstalt, oder mit einem von der Reichsanstalt geachteten Apparat untersucht worden. Die Werthe von ξ und β sind in der nachfolgenden Tabelle für einen halben Cyclus angegeben; μ (Fig. 85) gilt für die vom unmagnetischen Zustand ausgehende aufsteigende Magnetisirungcurve. Die Stahlarten von Gruson und Oeking sind nicht so sehr von dem Krupp'schen verschieden, dass ihre Curven noch zweckmässig in die Fig. 85 aufgenommen werden konnten.

Die Curve für Gusseisen ist je nach der Qualität sehr verschieden. Im Allgemeinen kann man sagen, dass die Durchlässigkeit proportional dem Kohlenstoffgehalt abnimmt.

Eine Uebersicht über die verschiedenen Methoden²⁾, die magnetischen Eigenschaften von Eisen zu messen, ist in des Verfassers Werk »Der Elektromagnet« zu finden.

1) Vergl. Hilfsbuch für die Elektrotechnik, 5. Aufl., S. 246.

2) Vergl. auch folgende Werke:

J. A. Ewing, verschiedene Abhandlungen in den Philosophical Transactions der Jahre 1885 bis 1894, zusammengefasst in seinem Werk: Magnetic Induction in Iron and other Metals. London 1894; deutsch von Holborn und Lindeck.

Werthe von \mathfrak{B} bei aufsteigender und bei abnehmender Magnetisirung, Werthe der Remanenz R , der Coërcitivkraft C und der Hysterese H .

\mathfrak{B}	Schwed.		Schmied.		Fluss.		Krupp 4		Gruson		Oeking	
	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑
0	-1,1	+1,3	-2,9	+2,9	-2,4	+2,2	-1,5	+1,5	-2,0	+2,0	-1,8	+1,8
5000	-0,8	+1,8	-1,9	+4,3	-1,6	+3,1	-0,7	+2,4	-1,0	+3,0	-1,1	+2,9
6000	-0,6	2,0	-1,5	5,0	-1,2	3,5	-0,5	2,5	-0,8	3,5	-0,9	3,4
7000	-0,4	2,2	-1,1	5,5	-1,0	3,8	-0,2	3,0	-0,6	4,0	-0,6	3,9
8000	-0,2	2,5	-0,7	6,4	-0,6	4,2	0	3,4	-0,3	4,5	+0,1	4,5
9000	0	2,7	-0,1	7,5	0	4,9	0,5	3,8	0	5,1	0,6	5,5
10000	+0,2	3,2	+0,7	8,8	+0,8	5,6	1,1	4,5	+0,4	6,2	1,2	6,4
11000	0,9	4,2	1,8	10,4	1,8	6,8	2,0	5,6	1,0	7,3	2,6	8,1
12000	1,9	5,5	3,5	12,8	3,0	8,2	3,0	7,0	2,0	9,0	3,9	10,3
13000	3,6	7,8	5,9	16,5	4,6	10,5	4,5	9,0	3,5	11,5	6,0	13,4
14000	8,0	13,5	10,8	22,4	7,2	13,9	6,6	11,8	6,2	16,2	9,7	18,2
15000	21,9	26,1	24,6	35,4	12,1	20,3	11,3	18,0	13,5	24,2	18,0	26,6
16000	54,5	57,5	54,2	61,0	26,7	34,0	29,3	33,5	33,0	38,7	40,0	46,0
17000	109,0	109,0	105,0	105,0	58,5	63,0	63,0	66,0	80,0	80,0	80,0	85,0
R	9120		9060		8950		8020		9300		8280	
C	1,2		2,9		2,3		1,5		1,8		1,8	
H	8400		20700		14700		10700		13500		14500	

Auf die moderne von Ewing begründete Moleculartheorie des Magnetismus hier einzugehen, würde zu weit führen; zum Studium dieser sehr wichtigen Theorie muss auf Ewing's Veröffentlichungen verwiesen werden.

Wirkungen des Luftzwischenraumes im magnetischen Kreise.

Sämmtliche erörterten Ergebnisse betreffen ausschliesslich die Vorgänge im Eisen selbst, wie auch die Curven der Magnetisirung sich nur auf die magnetischen Materialien beziehen.

Befindet sich indessen im magnetischen Kreise ein Luftzwischenraum, so leuchtet ein, dass es einer Vermehrung der magnetisirenden Kraft bedarf, um die gleiche Zahl magnetischer Linien durch die Zwischenlage von geringerer Durchlässigkeit zu treiben.

Dr. J. Hopkinson, Abhandlungen in den Philosophical Transactions der Jahre 1885 bis 1895.

H. J. G. Dubois, Magnetische Kreise, deren Theorie und Anwendungen. Berlin 1894.

Dugald E. Jackson, Electromagnetism and the Construction of Dynamos (Macmillan).

Die Fig. 86 erläutert das Gesagte. Die Curve OeC stellt die Beziehung zwischen den erregenden Ampère-Windungen (§1: 1,257) und den von ihnen erzeugten magnetischen Linien im Eisen dar. Der Höhe e entspricht die Erregung Ox_1 . In demselben Diagramm stellt die Linie ObB die Beziehung zwischen der Strömung der magnetischen Linien durch den Luftzwischenraum und den Ampère-Windungen dar, die nothwendig sind, um die Linien hindurch zu treiben. Besässe der Zwischenraum 1 cm Länge, so würden 0,795 Ampère-Windungen des Stromes ein Feld $\mathfrak{H} = \mathfrak{B} = 1$ hervorbringen.

Im vorliegenden Falle ist der vorausgesetzte Zwischenraum von geringerer Länge als 1 cm; die Linie steigt so, dass Ox_2 die

Ampère-Windungen darstellt, die erforderlich sind, um die magnetische Strömung bis b zu steigern; dieser Punkt liegt mit e auf gleicher Höhe. Der gesammte Betrag der Erregung, der nothwendig wird, um die Linien durch Luft und

Eisen zu treiben, wird (abgesehen von der Zerstreung von Linien) durch die Summe der Einzelbeträge gebildet ($Ox_1 + Ox_2 = Ox_3$). Hieraus ergibt sich der Punkt r durch die Summen der Entfernungen von e und b von der Ordinatenachse. Zeichnet man in dieser Weise eine Anzahl Punkte, so ergibt sich die resultirende Curve OrR . Das Vorhandensein eines Zwischenraumes im magnetischen Kreise hat ersichtlich die Wirkung, dass die Curve flacher wird, die Anfangssteigung wird durch den Luftzwischenraum bestimmt.

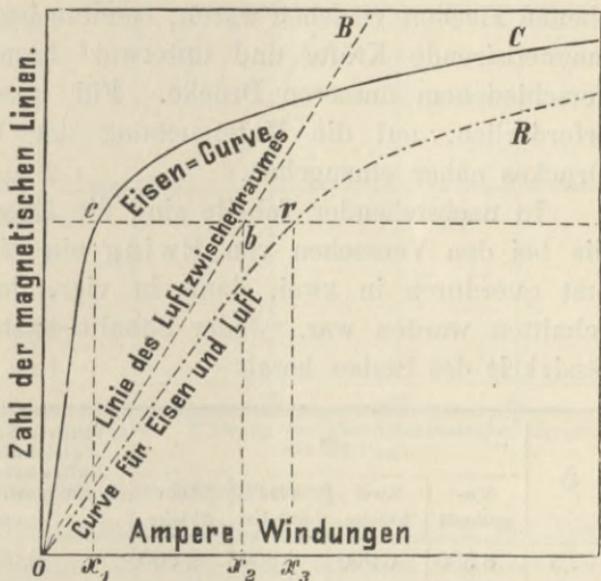


Fig. 86. Magnetisierungscurven eines magnetischen Kreises mit Luftzwischenraum.

Wirkung von Verbindungsstellen.

Nachdem wir nunmehr die zusätzliche magnetisirende Kraft zu berechnen vermögen, die nothwendig ist, um die magnetischen Linien durch einen Luftzwischenraum zu treiben, lässt sich ein bisher

unerörterter Umstand behandeln, nämlich die Wirkung der Verbindungsstellen im Eisen auf den Widerstand des magnetischen Kreises.

Es lässt sich lediglich durch Versuche bestimmen, in wie weit ein Schnitt quer durch das Eisen die Strömung der magnetischen Linien behindert. Von J. J. Thomson und Newall sind hierüber 1887 in den Cambridge Philosophical Society Proceedings Untersuchungen veröffentlicht worden, neuerdings auch im Philosophical Magazine für September 1888 von Ewing. Ewing untersuchte nicht nur die Wirkung von Durchschnitten, welche mit genau ebenen Flächen versehen waren, sondern benutzte auch verschiedene magnetisierende Kräfte und unterwarf ferner die Verbindungsstelle verschiedenem äusseren Drucke. Für unsere Zwecke ist es nicht erforderlich, auf die Untersuchung der Wirkung eines äusseren Druckes näher einzugehen.

In nachstehender Tabelle sind die Ergebnisse zusammengestellt, die bei den Versuchen von Ewing ein Eisenstab lieferte, der zuerst querdurch in zwei, dann in vier, dann in acht Stücke zerschnitten worden war. Jeder Schnitt setzte die scheinbare Durchlässigkeit des Stabes herab.

§	§				Mittlere Stärke des gleichwerthigen Luftzwischenraumes für einen Schnitt cm	Stärke des Eisens von gleichwerthigem Widerstand für einen Schnitt cm
	Ungetheilt	Zwei Stücke	Vier Stücke	Acht Stücke		
7,5	8 500	6 900	4 800	2 600	0,0036	4
15	13 400	11 550	8 900	5 550	0,0030	2,53
30	15 350	14 550	12 940	9 800	0,0020	1,10
50	16 400	15 950	15 000	13 330	0,0013	0,43
70	17 100	16 840	16 120	15 200	0,0009	0,22

Angenommen, wir arbeiten mit einer Magnetisirung des Eisens von 16 000 Linien für das Quadratcentimeter, die eine magnetische Kraft etwa von $\mathfrak{H} = 50$ erfordert, so ergibt sich aus der obestehenden Tabelle, dass jede Verbindungsstelle im Eisen ebensoviel Widerstand bietet als ein Luftzwischenraum von 0,0013 cm oder ebensoviel Widerstand hinzufügt, wie eine Eisenlage von 0,43 cm Länge.

Bei schwachen magnetischen Kräften bedeutet ein Schnitt mit guten Flächen dasselbe, als wenn ein Luftzwischenraum von 3 mm Ausdehnung vorhanden oder der Eisenkreis 2,5 cm länger wäre. Wendet man starke magnetisierende Kräfte an, so vermindert sich die

Wirkung, und zwar wahrscheinlich wegen der stärkeren Anziehung der Schnittflächen. Bei hohen magnetisirenden Kräften, die bis 15000 oder 20000 Linien für das Quadratcentimeter erzeugen, wird ein Druck von 9 bis 16 kg auf das Quadratcentimeter der Schnittflächen infolge der Anziehung ausgeübt, und die Widerstände werden dadurch beträchtlich vermindert, und zwar bis auf ungefähr $\frac{1}{20}$ ihres Anfangswerthes.

Die Ergebnisse von Ewing sind in der Fig. 87 dargestellt. Sobald die Schnittflächen sorgfältig eben bearbeitet waren, erschien die schädliche Wirkung der Schnitte sehr vermindert und bei Anwendung eines starken Druckes fast ausgeglichen.

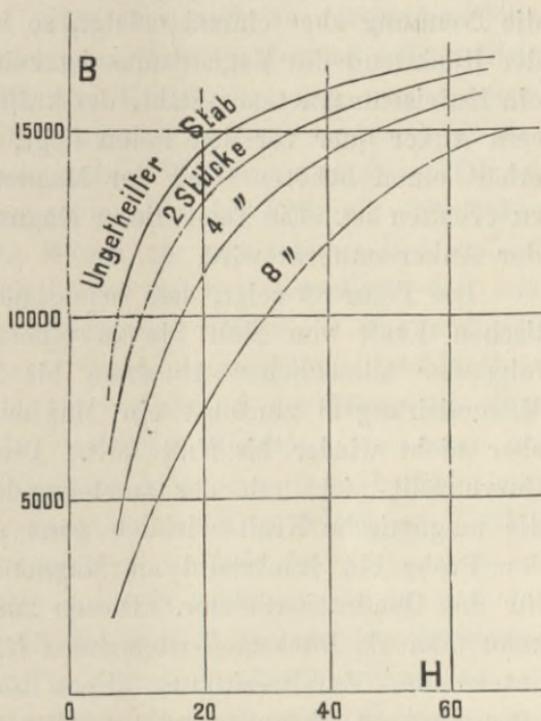


Fig. 87. Wirkung von Verbindungsstellen (Curven von Ewing).

Wirkungen der Erwärmung.

Wird Eisen in einem starken magnetischen Felde bis über 600 Grad C. erhitzt, so beginnt es seine magnetischen Eigenschaften zu verlieren; bei etwa 780 Grad C. verschwinden dieselben gänzlich. Bei Temperaturen zwischen 0 Grad und 100 Grad ist die Wirkung der Erwärmung so gering, dass sie für praktische Zwecke völlig vernachlässigt werden kann.

Rückständiger Magnetismus.

Es ist bekannt, dass verschiedene Arten magnetischer Materialien — Magneteisenstein, Stahl (besonders gehärteter Stahl) und harte Eisensorten — rückständigen Magnetismus zeigen, sobald sie magnetisirenden Kräften unterworfen worden waren. Es ist ebenso bekannt, dass geschlossene Kreise aus weichem Eisen — sogar dem weichsten — so lange einen Rückstand von Magnetismus zeigen als der gebildete Kreis nicht unterbrochen wird. Eine sehr einfache Erläuterung dieser Thatsache liefert jeder Elektromagnet, der mit seinem Kerne und gut passendem Anker einen geschlossenen magnetischen Kreis bildet. Wird der Magnet durch einen Strom erregt und dieser

geöffnet, so fällt der Anker in der Regel nicht ab, und es kann sogar ziemliche Kraft erforderlich werden, um den Anker abzureissen. Ist die Trennung aber einmal erfolgt, so haftet der Anker nicht wieder, der Rückstand des Magnetismus ist kein dauernder. Aehnlich kann ein Hufeisenmagnet aus Stahl, der kräftig magnetisirt wird, während sein Anker quer vor den Polen liegt, »übersättigt« werden, d. h. er erhält einen höheren Grad der Magnetisirung, als solcher dauernd zu erhalten ist. Ein Theil dieser Magnetisirung verschwindet, sobald der Anker entfernt wird.

Die Figur 83 zeigt, dass bei allmählicher Zunahme der magnetischen Kraft von Null bis zu einem hohen Werthe und darauf folgender allmählicher Abnahme bis Null die resultirende innere Magnetisirung \mathfrak{B} zunächst ein Maximum erreicht, dann abnimmt, aber nicht wieder bis Null fällt. Die vom Maximum absteigende Curve fällt nicht mit der aufsteigenden Curve zusammen. Wenn die magnetische Kraft wirklich ganz aufgehört hatte, so blieb bei der Probe ein Rückstand an Magnetismus von etwa 7300 Linien für das Quadratcentimeter. Diesen zurückbleibenden Werth von \mathfrak{B} kann man als Rückstand (Remanenz R , siehe Tabelle auf Seite 120) bezeichnen. Zur Beseitigung dieses Rückstandes muss eine negative magnetische Kraft angewendet werden. Wird genügende magnetische Kraft angewendet, so fällt die Curve ab und schneidet die Abscissenachse in einem Punkte links vom Anfangspunkte; bei stärkeren negativen magnetischen Kräften wird das Probestück mit magnetischen Linien durchsetzt, die in umgekehrter Richtung verlaufen. Der besondere Werth der negativen magnetischen Kraft, die erforderlich ist, um die zurückbleibende Magnetisirung auf Null herabzubringen, wurde von Hopkinson »Coërcitiv«-Kraft (C , siehe Tabelle auf Seite 120) genannt.

Bei dem Probestück aus weichem Eisen (Fig. 83) beträgt die Coërcitivkraft in C.G.S.-Einheiten etwa 2. Man kann diese Kraft, die nothwendig ist, um irgend ein Eisenstück von der zurückbleibenden Magnetisirung zu befreien, als ein Maass für das Bestreben des Eisens ansehen, je nach seiner besonderen Eigenschaft Dauermagnetismus zu behalten. Harte Eisen- und Stahlsorten zeigen stets grössere Coërcitivkraft als weichere Eisensorten. Während die Kraft z. B. bei weichem Schmiedeeisen etwa 2 beträgt, stellt sie sich bei hartem Stahl auf mehr als 50.

Hysteresis.

Ewing, der sich vorzugsweise mit der Erforschung von Nachwirkungen, die durch verschiedene Eigenschaften von Eisen und

Stahl hervorgerufen werden, beschäftigt hat, bezeichnete mit Hysteresis das Bestreben der Wirkungen, hinter den sie erzeugenden Ursachen in der Phase zurückzubleiben. Man untersucht in geeigneter Weise die magnetische Hysteresis, indem ein Probestück einem vollständigen Kreislaufe (oder einer Anzahl von Kreisläufen) von magnetischen Kräften unterworfen wird. Die magnetische Kraft beginne z. B. bei Null und wachse bis zu einem hohen Werthe, etwa $\mathfrak{H} = 200$ an, falle dann wieder bis Null, werde nun in der Richtung umgekehrt, nehme einen hohen negativen Werth an und falle endlich wieder auf Null. Die Figur 88 zeigt einen solchen Kreislauf, der den Untersuchungen von Ewing entnommen worden ist und sich auf eine Versuchsreihe mit einem Stück ausgeglühten Stahldrahtes (Clavierdraht) bezieht. Die Curve beginnt in der Mitte des Diagramms. Wächst \mathfrak{H} nach der positiven Richtung, so steigt die Curve zuerst concav nach rechts an, biegt sich dann herüber und erreicht, sobald $\mathfrak{H} = 90$ ist, einen etwas höhern Werth als 14000. Wird nun \mathfrak{H} bis auf Null vermindert, so fällt die Curve nicht so schnell, als sie früher anstieg; wenn $\mathfrak{H} = 20$ ist, so ist erst der Werth von 12000 erreicht, und bei $\mathfrak{H} = 0$ beträgt der Rückstand noch etwa 10500. Lässt man in diesem Punkte \mathfrak{H} wieder bis auf 90 anwachsen, so gelangt, wie die feine Linie zeigt, \mathfrak{B} wieder auf den Werth 14000. Wird indessen die Richtung der magnetischen Kraft von $\mathfrak{H} = 0$ entgegengesetzt gerichtet, so fällt die Curve nach links ab und schneidet die horizontale Achse bei -24 ; dies ist deshalb der Werth der Coërcitivkraft. Verstärkt man die umgekehrte magnetische Kraft bis $\mathfrak{H} = -90$, so wächst die umgekehrte Magnetisirung bis $\mathfrak{B} = -14000$ oder etwas höher an. Wird nunmehr die umgekehrte magnetische Kraft wieder auf Null gebracht, so kehrt die Curve nach rechts hin wieder zurück und schneidet die Ordinate bei $\mathfrak{B} = -10500$ (dem negativen Rückstande). Kehrt man bei diesem Punkte die magnetische Kraft abermals um, so findet man bei $\mathfrak{H} = 24$ die Magnetisirung wieder gleich Null. Bei weiterem Anwachsen von \mathfrak{H} steigt die Magnetisirung schnell an, folgt aber nicht der ersten Curve, und gelangt bei $\mathfrak{H} = 90$ zu gleicher Höhe wie vorhin.

Kreisläufe der Magnetisirung.

Lässt man irgend eine Eisen- oder Stahlsorte die vorhin beschriebenen Kreisläufe der Magnetisirung durchmachen, so erhält man stets Curven mit eingeschlossener Fläche, wie in der Figur 88.

Wie Warburg¹⁾ und Ewing²⁾ gezeigt haben, erhält diese Thatsache dadurch besondere Bedeutung, dass die umschlossene Fläche ein Maass für die Arbeit liefert, die bei einem vollständigen Kreislaufe der Magnetisirung verbraucht wird. Ebenso wie die Fläche auf einem Indicator-Diagramm einer Dampfmaschine ein Maass für die in nutzbare Arbeit umgesetzte Wärme in dem Kreislaufe der Wirkung der Maschine bildet, ebenso ist in dem magnetischen Kreislaufe die von der Curve umschlossene Fläche ein Maass für die in (nutzlose) Wärme umgesetzte Arbeit³⁾.

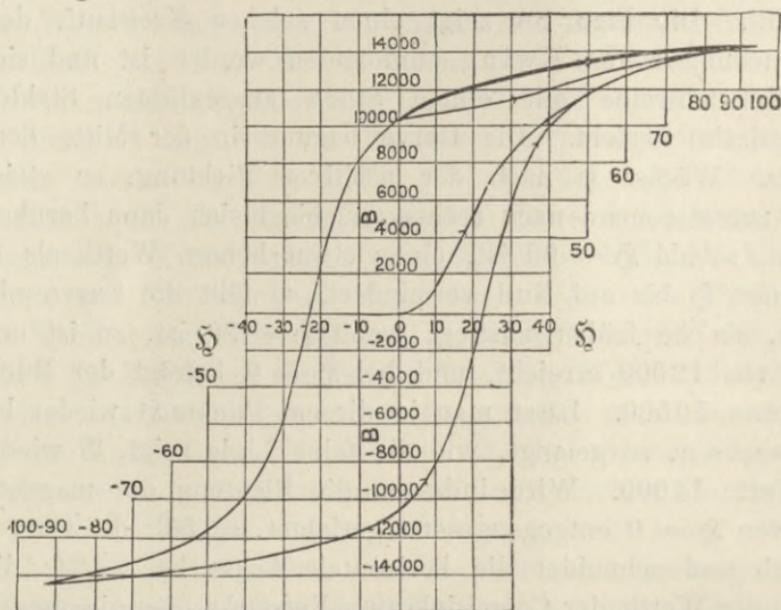


Fig. 88. Kreislauf der Magnetisirung bei ausgeglühtem Stahldrahte.

In der Figur 89 ist zur Vergleichung eine Curve für Stahl und eine solche für Eisen dargestellt. In jedem Falle stellt die eingeschlossene Fläche die Arbeit dar, die bei Anwendung wechselnder

1) Wied. Ann., Bd. 13, S. 141. 1881.

2) Proc. Royal Soc., Bd. 21, S. 22. 1881; Bd. 34, S. 39. 1884; Bd. 35, S. 1. 1885; Phil. Trans., Bd. 2, S. 523. 1885.

3) Der Beweis dafür ist folgender: In einem magnetischen Felde von der Stärke \mathfrak{H} gebraucht man \mathfrak{H} Einheiten Arbeit, um die Einheit des Magnetismus auf eine Länge von 1 cm gegen die magnetisirenden Kräfte zu bewegen. Da auf jede magnetische Einheit nun 4π Linien entfallen, so beträgt die während eines Kreislaufes in einem Cubikcentimeter Eisen geleistete Arbeit $\frac{1}{4\pi} \int \mathfrak{H} d\mathfrak{B}$ (H siehe Tabelle Seite 120). Sind \mathfrak{H} und \mathfrak{B} in C. G. S.-Einheiten ausgedrückt, so erhält man die Arbeit in Erg für das Cubikcentimeter. Multiplicirt man diesen Werth mit der Anzahl der Kreisläufe in der Secunde und dividirt durch 10^7 , so erhält man die Zahl der verbrauchten Watt.

magnetisirender Kräfte im Eisen verbraucht wird. Bei sehr weichem Eisen liegen die aufsteigenden und absteigenden Curven dicht zusammen, die eingeschlossene Fläche ist klein, im magnetischen Kreisläufe wird sehr wenig Energie verbraucht. Bei hartem Eisen und besonders bei Stahl besteht im Gegentheile ein erheblicher Zwischenraum zwischen den Curven und ein grosser Aufwand an Energie ist erforderlich. Die während eines Kreislaufes verlorene Energie ist nicht nur abhängig von dem Materiale, sondern auch von dem Grade der Magnetisirung, der erreicht worden ist, also von der Amplitude des Kreislaufes.

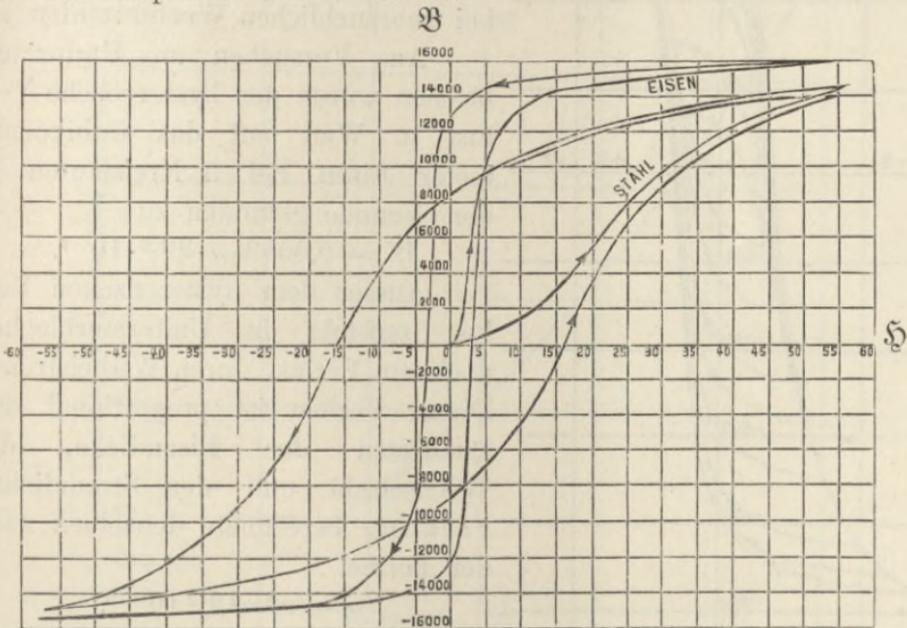


Fig. 89. Hysteresis in Schmiedeeisen und Stahl.

Fig. 90, welche J. A. Ewing's Abhandlungen¹⁾ entnommen ist, zeigt die Kreisläufe eines Stückes von weichem ausgeglühten Eisendraht, welcher anfangs schwachen, später allmählich auf ± 7 C.G.S. gesteigerten magnetisirenden Kräften \mathfrak{H} ausgesetzt wurde. Wie man sieht, wächst mit der Amplitude der Kreisläufe — und zwar rascher als diese — auch die von der Curve eingeschlossene Fläche, mit anderen Worten, der Energieverlust in einem Kreislauf wird unverhältnissmässig grösser, wenn \mathfrak{B} vermehrt wird.

C. P. Steinmetz²⁾ drückt die Beziehungen zwischen dem durch Hysteresis verursachten Energieverlust V in Erg auf das Cubik-

1) Phil. Trans. 1885. S. 555.

2) Amer. Inst. Elec. Engineers, 19. Januar 1892; Electrician, 12., 19. und 26. Februar 1892.

centimeter Eisen während eines Kreislaufes und der magnetischen Dichte \mathfrak{B} durch die Gleichung

$$V = \eta \mathfrak{B}^{1,6}$$

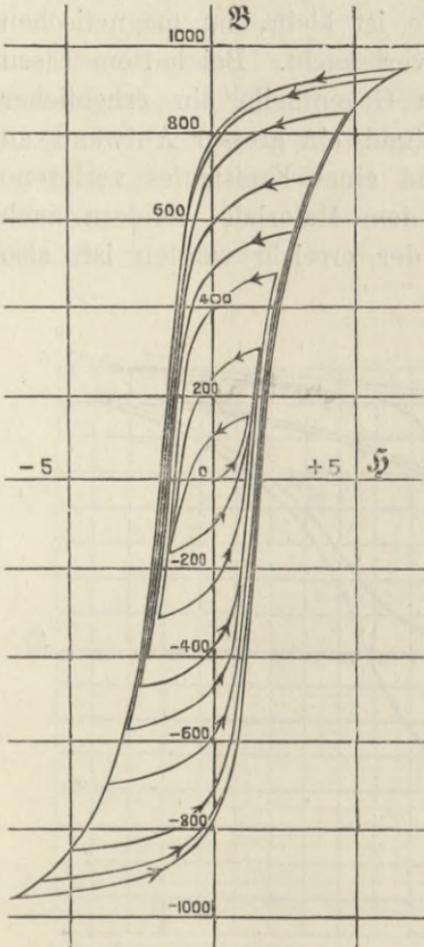


Fig. 90. Aufeinanderfolgende Kreisläufe mit wachsender Amplitude.

aus, worin η ein von der Eisensorte abhängiger Coëfficient, der Coëfficient der magnetischen Hysteresis ist. Die Gleichung gilt für Kreisläufe bis zu 200 in der Secunde. Die nachstehende Tabelle giebt die Werthe des Coëfficienten η für verschiedene Materialien¹⁾ bei gebräuchlichen Wechselzahlen an.

Aus Versuchen an Umformerblechen wurde der hysteretische Verlust in Watt auf das Cubikcentimeter Eisen bei n Kreisläufen in der Secunde gefunden zu

$$W = 0,0033 \cdot n \cdot \mathfrak{B}^{1,6} \cdot 10^{-7}.$$

Ausser dem hysteretischen Verlust entsteht in Umformerblechen noch ein Verlust durch Wirbelströme. Dieser Verlust ist proportional den Quadraten der Eisendicke, der Wechselzahl und der Stromdichte. Fleming berechnete denselben nach der Formel

$$y = x^2 n^2 \mathfrak{B}^2 10^{-16},$$

worin x die Dicke der Kernstreifen in Millimeter und y der Verlust in

Coëfficient der magnetischen Hysteresis für verschiedene Materialien.

Material	Coëfficient η	Material	Coëfficient η
Sehr weicher Eisendraht . . .	0,002	Weicher geglühter Gussstahl .	0,008
Sehr dünnes weiches Eisenblech	0,0024	Weicher Maschinen-Stahl . .	0,0094
Dünnes gutes Eisenblech . . .	0,003	Gussstahl	0,012
Dickes Eisenblech	0,0033	Gusseisen	0,016
Gewöhnliches Eisenblech . . .	0,004	Harter Gussstahl	0,025
Umformer-Kerneisen	0,0045		

1) Wegen Einzelheiten über Ewing's Magnetische Prüfvorrichtung zum Messen der Hysteresis in Eisenblech vergl. Inst. Elec. Engineers, 25. April 1895, auch Electrician, Bd. 34, S. 786.

Watt auf das Cubikcentimeter des Kernes ist. Der Gesamtverlust, der durch Hysterisis und Wirbelströme verursacht wird, beträgt demnach in Watt:

$$W = 0,0033 \cdot n \cdot \mathfrak{B}^{1,6} \cdot 10^{-7} + x^2 n^2 \mathfrak{B}^2 10^{-16}.$$

Die Formel ergibt mit der Praxis gut übereinstimmende Werthe.

Wenn in einem Umformer das Eisen eine gewisse Zahl von Kreisläufen in der Secunde durchmacht, so entsteht ein fortwährender Verlust, der in Watt auf das Kilogramm Eisen gemessen werden

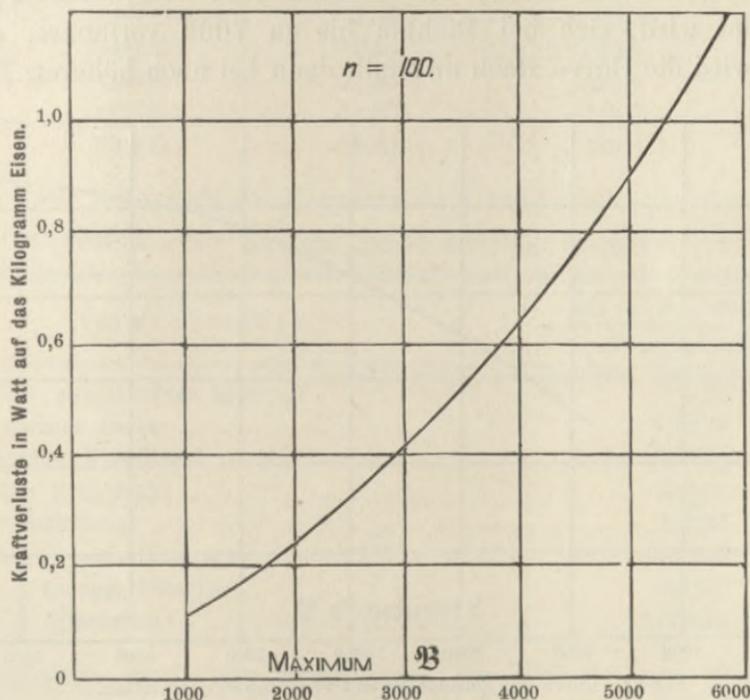


Fig. 91. Curve der Kraftverluste für das Kilogramm Eisen bei verschiedenen Maximal-Dichten \mathfrak{B} .

kann, denn die Höhe des Verlustes ist abhängig von der Menge des magnetisirten Eisens.

In Fig. 91 sind die den verschiedenen magnetischen Dichten \mathfrak{B} entsprechenden Verluste in Watt auf das Kilogramm Eisen in einer Curve¹⁾ aufgetragen, die eine stetig wachsende Steigung zeigt. Man ersieht daraus, dass es nicht ökonomisch ist, bei Transformatoren \mathfrak{B} sehr hoch zu wählen. Der vortheilhafteste Werth hängt von verschiedenen Umständen ab, von dem mehr oder weniger häufigen Gebrauch und den Beschaffungskosten des Transformators, sowie von dem Betrage des Verlustes, den man für zulässig erachtet. Eine

1) Kapp, Journ. Inst. Electr. Engin., Bd. 13, S. 207. 1894.

magnetische Dichte von 4000 ist sehr gebräuchlich. Durch Vermehrung der magnetischen Dichte kann man den Querschnitt des Eisens und somit das Gesamtgewicht desselben verringern, und dies vermindert bis zu einem gewissen Grade den Gesamtverlust, obwohl der Verlust auf das Kilogramm wächst. Eine andere Veranlassung, die magnetische Dichte in einem Transformator zu vermehren, liegt darin, dass für sehr geringe Dichten die Durchlässigkeit des Eisens kleiner ist als für Dichten von ungefähr 7000. Die Curve in Fig. 92 zeigt, wie die Durchlässigkeit von Eisen, wie es zum Bau von Transformatoren verwendet wird, sich bei Dichten bis zu 7000 vermehrt; darüber hinaus wird die Curve flach und fällt dann bei noch höheren Dichten;

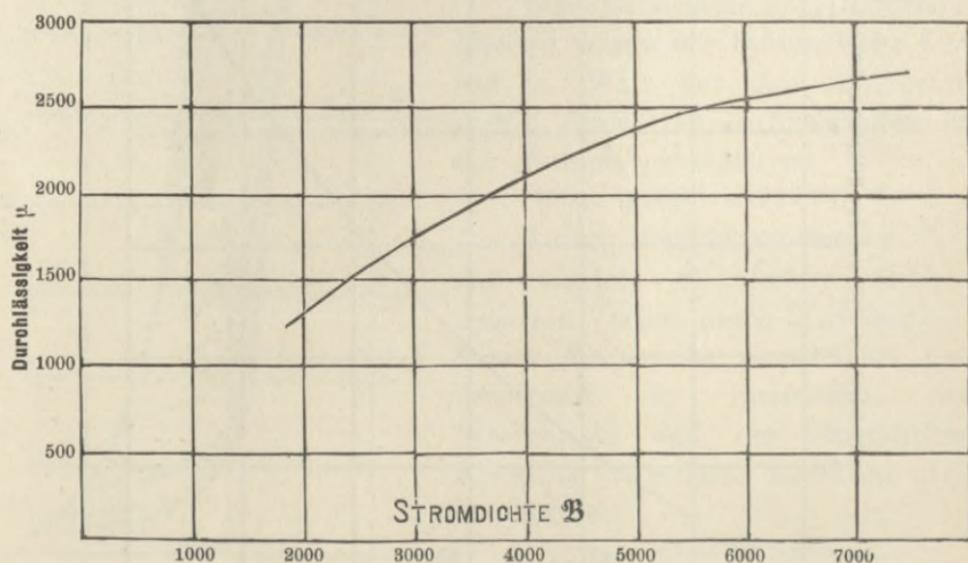


Fig. 92. Curve der Durchlässigkeit von Transformatoreisen.

dies zeigen auch die Curven der Fig. 85. Dieselbe Thatsache ergibt sich auch aus den Curven der Fig. 90, denn die Steigung der Linie, welche den höchsten Punkt eines Kreislaufs mit dem Anfangspunkt verbindet, giebt die Durchlässigkeit des Eisens für jenen Kreislauf an, soweit sie den für den Transformator erforderlichen magnetisirenden Strom beeinflusst. Durch Vermehrung der Durchlässigkeit erreichen wir eine beträchtliche Ersparniss an der Energie, die zum Magnetisiren erforderlich ist.

Die folgende Tabelle ergibt die Anzahl von Watt (1 Watt = $\frac{1}{736}$ P), die durch Hysterisis in weichem, gut geblättertem Schmiedeeisen bei schnellem Wechsel der Magnetisirung verbraucht werden.

Ø	Verbrauch in Watt in 1 ccm Eisen bei 10 Kreisläufen in der Secunde	Verbrauch in Watt in 1 ccm Eisen bei 100 Kreisläufen in der Secunde
4 000	1,43	14,3
5 000	1,70	17,0
6 000	2,67	26,7
7 000	3,30	33,0
8 000	4,00	40,0
10 000	5,56	55,6
12 000	7,37	73,7
14 000	9,35	93,5
16 000	11,56	115,6
17 000	14,00	140,0
18 000	17,40	174,0

Für die bei kräftiger Magnetisirung verschiedener Eisen- und Stahlsorten verbrauchte Energie giebt Ewing folgende Werthe an:

Versuchsstück	Erg in 1 ccm Eisen bei einem vollständigen Kreislaufe der Magnetisirung
Sehr weiches ausgeglühtes Eisen	9 300
Weniger weiches Eisen	16 300
Hart gezogener Eisendraht	60 000
Ausgeglühter Stahldraht	70 500
Glasharter Stahldraht	76 000
Klavierdraht (gewöhnlicher)	116 300
„ (ausgeglühter)	94 000
„ (glasharter)	117 000

Vergleiche auch die Werthe in der Tabelle auf Seite 120. Hopkinson erhielt für einige Proben noch grössere Werthe. Er fand, dass in Oel gehärteter Wolframstahl, der wegen seiner grossen Coërcitivkraft zu Dauermagneten verwendet wird, nicht weniger als 216864 Erg für 1 ccm in einem Kreislauf verbraucht. Er fand ferner, dass der Inhalt der von einer Curve, wie sie in Fig. 88 dargestellt sind, umschriebenen Fläche gleich ist einem Rechtecke, dessen Höhe der doppelten Remanenz und dessen Breite der doppelten Coërcitivkraft gleich ist.

Ewing hat nachgewiesen, dass Erschütterungen die rückständigen Wirkungen zerstören.

Finzi fand ¹⁾, dass Eisenkerne, während sie von Wechselströmen durchlaufen werden, keine Hysteresis zeigen; die aufsteigenden und

1) Vergl. The Electrician, Bd. 26, 3. April 1891.

absteigenden Curven der Magnetisirung fallen dann zusammen. Ebenso ist auch erwiesen, dass bei sehr schnellen Wiederholungen weniger Arbeit während eines Kreislaufes verbraucht wird, als wenn die Kreisläufe langsam aufeinander folgen.

Läuft ein Ankerkern in einem starken magnetischen Felde um, so erfährt die Magnetisirung des Eisens fortwährend einen Kreislauf, jedoch in einer ganz anderen Weise, als wenn die magnetisirende Kraft periodisch umgekehrt wird, wie dies in dem Kerne eines Umsetzungsapparates der Fall ist. Mordey¹⁾ fand die Verluste durch Hysteresis in dem ersteren Falle etwas geringer, als im letzteren Falle.

Anwachsen des Magnetismus.

Ewing hat noch eine andere Art von Nachwirkungen gefunden, die er als »zähe Hysteresis« (viscous hysteresis) bezeichnete. Es soll dieser Name das allmähliche Anwachsen der Magnetisirung ausdrücken, das eintritt, wenn eine magnetische Kraft mit völliger Stetigkeit auf ein Stück Eisen wirkt. Das allmähliche Anwachsen kann eine halbe Stunde oder länger stattfinden und einige Procent der gesammten Magnetisirung betragen. Es ist das in der That eine verzögerte Magnetisirung, aber nicht mit der schon erörterten, als Hysteresis bezeichneten Phasenverzögerung oder mit der anscheinenden Verzögerung zu verwechseln, die der Verzögerung des magnetisirenden Stromes aus Anlass der Selbstinduction entstammt, oder ferner mit der anscheinenden Verzögerung, die bei ungeblätterten Eisenkernen beobachtet und durch die in der Masse des Eisens umlaufenden Wirbelströme hervorgebracht wird.

Verzögerung des Magnetismus.

Man hat schon lange gewusst, dass in ungetheilten Kernen von Elektromagneten das Ansteigen und Fallen des Magnetismus durch Wirbelströme im Eisen verzögert wird, da die Aussenseite des Eisens sich zuerst magnetisirt, wenn der Strom geschlossen wird, während der Magnetismus des inneren Theiles erst später anwächst, wenn die Wirbelströme in den äusseren Theilen bereits verschwinden. Es findet daher eine regelmässige Durchdringung oder Fortpflanzung des Magnetismus von den äusseren Theilen des Kernes nach den inneren statt. Wenn der magnetisirende Strom aufhört, verliert das Innere des Kernes seinen Magnetismus zuletzt. Bei grossen Dynamomaschinen mögen viele Minuten vergehen, bevor der Magnetismus

1) Vergl. Ewing in The Electrician, Bd. 27, S. 602. 1891.

sein Maximum erreicht. Aus diesem Grunde hielt es der Verfasser für nützlich, Dynamomaschinen mit grossen massiven Elektromagneten, die als Stromerzeuger für elektrische Eisenbahnen dienen, mit einer gemischten Wickelung zu versehen. Es ist sogar möglich, dass der innerste Theil des Kernes eines Elektromagnets eine Magnetisirung hat, die derjenigen der äusseren Lagen entgegengesetzt gerichtet ist. Die Erscheinung der magnetischen Verzögerung in ungetheilten Kernen ist noch kürzlich von Hopkinson und Wilson¹⁾ erforscht worden, welche hierzu einen mit Eisen umgebenen Elektromagnet mit einem zwölffölligen Kern gebrauchten, in welchen auf verschiedene Tiefen zur Prüfung dienende Wickelungen eingelassen waren. Hopkinson zeigte, dass die Verzögerung sich mit dem Quadrate der linearen Abmessungen ändert. Er prüfte auch die Wirkung, wenn sich die magnetisirende Kraft periodisch änderte und fand, dass die Tiefe, bis auf welche die Magnetisirung eindringt, von der Wechselzahl abhängig ist (vergl. Kap. XXII).

Langsame Veränderungen in den magnetischen Eigenschaften des Eisens.

Wenn Eisen durch rasch wechselnde Ströme eine Zeit lang magnetisirt wird, erleiden seine magnetischen Eigenschaften eine kleine Veränderung dergestalt, dass die Energie, welche nöthig ist, um es durch einen bestimmten Kreislauf zu bringen, grösser wird. Diese Wirkung ist bei Wechselstrom-Transformatoren beobachtet worden und beruht auf einer physikalischen Veränderung des Eisens, welche seine Durchlässigkeit oder seine hysteretischen Verluste oder Beides beeinflusst. Ob die Veränderung unmittelbar von dem beständigen Wechsel der Magnetisirung herrührt, oder ob sie eine Folgeerscheinung ist, welche von dem Warmwerden herrührt oder von der Compression, die bei der Ausdehnung des Eisens unter dem Einfluss der Erwärmung stattfindet, ist noch nicht sicher festgestellt, aber eine Reihe von Versuchen, welche Mordey²⁾ anstellte, geben Grund zu der Annahme, dass die letztere Ursache eine genügende Erklärung für die Erscheinung darbietet.

Näherungsformel für das Gesetz des Elektromagnets.

Vor der Entdeckung des Gesetzes des magnetischen Kreises wurden viele Versuche gemacht, eine brauchbare Formel für die Grösse des Magnetismus zu finden, welcher in einem gegebenen

1) Journ. Inst. Electr. Engin., Februar 1895 und Philos. Trans., 1895.

2) Proc. Roy. Soc., Bd. 7. 1894.

Elektromagnete durch einen gegebenen Strom erzeugt wird. Ueber diese Versuche ist in der zweiten und dritten Ausgabe dieses Werkes ausführlich berichtet worden. Da sie jetzt nicht mehr für den Entwurf von Dynamomaschinen benutzt werden, so kann man sie sehr kurz behandeln.

Die früheste Annahme von Lenz und Jacobi setzte ein einfaches Verhältniss zwischen dem erregenden Strome und dem erzeugten Magnetismus voraus. Hiernach würde die Magnetisirungscurve vom Anfangspunkte ab in einer geraden Linie ansteigen. Joule wies die Unrichtigkeit dieses Gesetzes nach und zeigte, dass bei genügender magnetisirender Kraft Sättigung eintrete.

Müller (und nach ihm v. Waltenhofen, Kapp u. A.) schlugen eine Tangentenformel vor; sie nahmen an, wenn der erregende Strom durch die Länge einer als Tangente an einen Kreis gezogenen geraden Linie dargestellt werde, dass der entsprechende Bogen den Betrag des Magnetismus darstelle. Dies giebt eine Sättigungsgrenze, stellt indessen nicht die Thatsachen in den früheren Zuständen der Magnetisirung dar. Gestützt auf theoretische Betrachtungen, schlug Lamont eine Exponentialformel vor, aus der er einen Näherungswerth herleitete unter der Annahme, dass die Durchlässigkeit in allen Stadien proportional sei dem Unterschiede zwischen dem wirklichen und dem überhaupt möglichen Höchstbetrage des Magnetismus.

Frölich¹⁾ nahm die Formel von Lamont wieder auf; sie wurde auch noch von Anderen in verschiedenen Formen benutzt, so vom Verfasser dieses Werkes. Angenommen, die magnetische Strömung \mathcal{C} werde bei dem Höchstwerth \mathcal{C}' vollständige Sättigung erfahren, und die Magnetisirbarkeit des Magnetes in jedem Stadium sei dem für die magnetischen Linien gelassenen Raum, d. h. $\mathcal{C}' - \mathcal{C}$ proportional. Bezeichnet dann N die Zahl der Windungen und i die Stromstärke, so bedeutet Ni die Zahl der erregenden Ampere-Windungen und \mathcal{C}/Ni das Verhältniss des Magnetismus zur erregenden Kraft oder die Magnetisirbarkeit. Dann kann man setzen

$$\frac{\mathcal{C}}{Ni} = \frac{\mathcal{C}' - \mathcal{C}}{h},$$

wenn h eine Constante für den betreffenden Elektromagnet bedeutet.

Aus der Gleichung folgt $\mathcal{C} = \mathcal{C}' \frac{Ni}{Ni + h}$.

Es ist klar, dass h diejenige besondere Zahl von Ampere-Windungen bedeutet, wodurch die Magnetisirbarkeit auf ihren halben

1) Elektrot. Zeitschrift 1881, S. 90, 139, 170 und 1882, S. 73. Vergl. auch Frölich: „Die dynamoelektrische Maschine“, Berlin 1886.

Anfangswerth zurückgeführt wird oder wodurch der Magnetismus zum halben Sättigungsgrade gebracht wird.

Diese Zahl der Ampere-Windungen bezeichnete der Verfasser als »diakritische« und den Strom, welcher die halbe Sättigung hervorbrachte, als »diakritischen« Strom. Frölich benutzte unabhängig diesen Begriff und verwendete ihn in seiner Formel für Dynamomaschinen. Die Beweisführung gebührt ihm, die Bedeutung aber, in welcher er benutzt wird, dem Verfasser. Obwohl die Formel von Frölich nicht den Unterschied zwischen den ansteigenden und absteigenden Magnetisirungscurven in Betracht zieht, genügt sie doch zu einer ersten Annäherung und ist daher von Nutzen. Ihre Richtigkeit beweist auch der Umstand, dass der Widerstand (oder der reciproke Werth der Durchlässigkeit) nahezu eine lineare Function von ξ ist, wie Fleming¹⁾ und Kenelly²⁾ gefunden haben.

Magnetische Einheiten.

Von der British Association ist der Vorschlag ausgegangen, die Einheit der Magnetisirung \mathcal{C} mit »Weber« zu bezeichnen. Ein Weber würde demnach gleich 10^8 magnetischen Linien des C.-G.-S.-Systems sein. Diese Grösse ist gewählt, um derjenigen des Volt zu entsprechen (vergl. Kap. IX, Formel Ia); so dass in einem Drahte, welcher 1 Weber in der Secunde schneidet, eine elektromotorische Kraft von 1 Volt entsteht. Es wurde ferner die Bezeichnung »Gauss« für die C.-G.-S.-Einheit des magnetischen Potentialgefälles vorgeschlagen; 1 Gauss würde danach $= \frac{10}{4\pi}$ Ampere-Windungen sein. Um Ampere-Windungen in Gauss umzuwandeln, muss man also mit $\frac{4\pi}{10}$ oder mit 1,257 multipliciren.

Ferner hat das American Institute of Electrical Engineers vorgeschlagen, unter Weber statt 10^8 nur 1 Linie zu verstehen und die Bezeichnung Gilbert für die oben als Gauss bezeichnete Einheit zu wählen, während sie den Namen Gauss unglücklicherweise für die Einheit der magnetischen Dichte, entsprechend also 1 Linie auf das Quadratcentimeter, wählt.

Anm. d. Uebers. Im Allgemeinen haben die Vorschläge, den magnetischen Einheiten Namen zu geben, keinen Anklang gefunden; es sollen daher in dieser Uebersetzung nur die absoluten C.-G.-S.-Einheiten ohne eigene Namen gebraucht werden.

1) Journ. Inst. Electr. Engin., Bd. 15, S. 570. 1886.

2) Electr. World, Bd. 17, S. 358. 1891.

Kapitel VII.

Der magnetische Kreis.

Wenn wir die magnetischen Eigenschaften des Materials, das wir benutzen wollen, kennen, sind wir im Stande, die Zahl der Ampere-Windungen zu berechnen, welche erforderlich ist, um eine gewünschte Strömung in dem magnetischen Kreise einer Dynamomaschine von beliebiger Bauart und Grösse hervorzubringen. Die magnetisierende Kraft \mathfrak{F} , welche 1,257 mal der Zahl der Ampere-Windungen AW gleich ist, hängt ab von dem Widerstand des Kreises und der verlangten Strömung \mathfrak{S} . Es ist daher allgemein

$$\mathfrak{F} = \mathfrak{R} \cdot \mathfrak{S}.$$

Da aber der Gesamt-Widerstand aus den hintereinander geschalteten Widerständen der einzelnen Theile des Kreises besteht, in welchen nicht nothwendigerweise die gleiche magnetische Strömung vorhanden sein muss, so ist

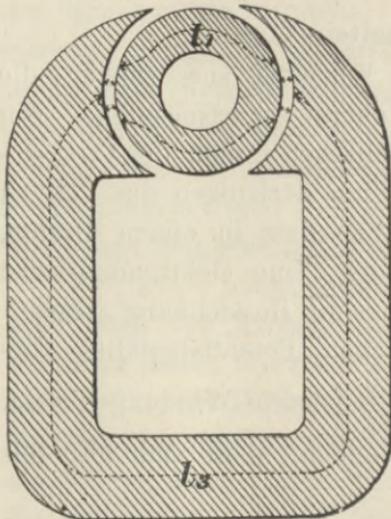


Fig. 93. Magnetischer Kreis einer Dynamomaschine.

es besser, die einzelnen Theile des Kreises für sich zu betrachten.

Wie die schematische Darstellung des magnetischen Kreises einer zweipoligen Dynamomaschine — Fig. 93 — zeigt, haben wir drei Theile zu unterscheiden, nämlich den eisernen Ankerkern, die beiden Luftzwischenräume und die eisernen Feldmagnete.

Bezeichnen wir die mittlere Länge des Weges einer magnetischen Linie im Ankerkern mit l_1 , den Querschnitt mit A_1 und die Durchlässigkeit mit μ_1 , so ist der Widerstand im Anker gleich $\frac{l_1}{\mu_1 A_1}$ (vergl. S. 114). Die Kraftlinienmenge \mathfrak{S} im Anker dividirt durch den

Querschnitt A desselben giebt die magnetische Dichte \mathfrak{B} , wonach μ_1 aus der Curve der Durchlässigkeit des benutzten Materials bestimmt werden kann. Dann giebt $\frac{\mathfrak{S} l_1}{\mu_1 A_1}$ die magnetisirende Kraft an, welche erforderlich ist, um die Kraftlinien durch den Ankerkern zu treiben. In ähnlicher Weise erhalten wir in $\frac{2 \mathfrak{S} l_2}{A_2}$ die erforderliche magnetisirende Kraft für die beiden Luftzwischenräume, wenn l_2 die Länge und A_2 den Querschnitt eines Zwischenraumes bezeichnen. Die Kraftlinienmenge in den Feldmagneten muss wegen der magnetischen Verluste grösser sein als in dem Anker. Wie weiter unten gezeigt wird, können wir die Gesamtmenge oder die Gesamtzahl der magnetischen Linien im Feldmagnet durch $v \mathfrak{S}$ ausdrücken, wobei v eine Zahl (gewöhnlich ungefähr 1,3) ist, welche aus der Form des Magnetes bestimmt werden kann (vergl. S. 145). Haben wir die Durchlässigkeit μ_3 des Materials der Feldmagnetes gefunden, wenn der Strom $v \mathfrak{S}$ durch den Querschnitt A_3 fliesst, so erhalten wir in $\frac{v \mathfrak{S} l_3}{\mu_3 A_3}$ die für diesen Theil des Stromkreises nothwendige magnetisirende Kraft.

Im Ganzen ist also erforderlich an Ampere-Windungen

$$A W = \frac{\mathfrak{F}}{1,257} = \frac{\mathfrak{S}}{1,257} \left\{ \frac{l_1}{\mu_1 A_1} + \frac{2 l_2}{A_2} + \frac{v l_3}{\mu_3 A_3} \right\}.$$

Diese Rechnungsmethode ist im Wesentlichen dieselbe, welche im Jahre 1886 von J. und E. Hopkinson sowie auch von Kapp vorgeschlagen wurde, aber Erstere gingen in ihren Untersuchungen noch weiter. Sie zeichneten für jeden Theil des magnetischen Kreises eine besondere Curve auf, welche die Beziehungen zwischen der magnetisirenden Kraft und der Magnetisirung darstellte, und erhielten durch Summation der einzelnen Curven eine resultirende charakteristische Curve. Dies geschah zunächst unter der Annahme, dass kein magnetischer Verlust vorhanden sei; nachdem so ein erster Näherungswerth erhalten, wurde das theoretisch erzielte Resultat mit den wirklichen Versuchswerthen verglichen und dadurch ein Mittel erhalten, die noch einzuführenden Correctionen abzuschätzen.

In Wirklichkeit bestimmten die Gebr. Hopkinson die Formel allerdings etwas allgemeiner. Anstatt μ für die verschiedenen Theile anzunehmen, begnügten sie sich mit der Annahme, dass die magnetische Induction in jedem Theile eine Function der in demselben wirksamen magnetischen Kraft sein muss. Wenn nun \mathfrak{S} magnetische

Linien durch die Schnittfläche von A qcm treten, so ist die Anzahl der Linien für das Quadratcentimeter, die magnetische Dichte \mathfrak{B} , gleich $\frac{\mathfrak{C}}{A}$. Demgemäss kann man die magnetische Kraft im Ankertheile des magnetischen Kreises durch $f\left(\frac{\mathfrak{C}}{A_1}\right) \cdot l_1$ ausdrücken. Diese Function lässt sich untersuchen und als Curve darstellen. Die auf Seite 116 gezeichneten Magnetisirungscurven sind in der That nur Curven, die eine Beziehung zwischen den magnetisirenden Kräften und dem von diesen inducirten Betrage an Magnetismus nachweisen. Einen ähnlichen Ausdruck $f\left(\frac{\mathfrak{C}}{A_3}\right) \cdot l_3$ erhält man für die magnetische Kraft, die im Feldmagnet wirkt; für die Zwischenräume ist die magnetische Kraft dagegen $\frac{\mathfrak{C}}{A_2} \cdot l_2$, denn für die Luft sind magnetisirende Kraft und erzeugter Magnetismus einander proportional. Die gesammte magnetisirende Kraft oder das Integral wird durch Summirung der obigen Werthe erhalten, die ergiebt:

$$l_1 f\left(\frac{\mathfrak{C}}{A_1}\right) + 2l_2 \left(\frac{\mathfrak{C}}{A_2}\right) + l_3 f\left(\frac{\mathfrak{C}}{A_3}\right) = \frac{4\pi AW}{10}.$$

Aus dieser Behandlungsweise des Gegenstandes entspringen folgende Vortheile: 1. die Benutzung der Function, deren Werth aus einer Curve oder Tabelle von Beobachtungen entnommen wird, wie solche in den vorigen Kapiteln zu finden sind, an Stelle des Gebrauches von μ stellt den Ausdruck allgemeiner dar; 2. die Werthe der einzelnen Ausdrücke werden verschieden durch die Zerstreung der magnetischen Linien beeinflusst, es wird nicht schwer, an jedem einzelnen eine Berichtigung besonders anzubringen.

Wenn wir nun für jeden der drei Ausdrücke Curven aufzeichnen, welche die Anzahl der Ampere-Windungen darstellen, die erforderlich sind, um verschiedene Mengen magnetischer Linien durch jeden der drei Theile des Kreises hindurchzutreiben, so können wir die drei Curven zu einer resultirenden vereinigen. Nachdem die Gebr. Hopkinson in dieser Weise eine charakteristische Curve der Magnetisirung hergestellt hatten, gingen sie zur Berichtigung derselben durch Berücksichtigung der Streuungsverluste über. Sie ermittelten, dass bei der Versuchsmaschine (Maschine von Edison-Hopkinson) nur etwa drei Viertel der in dem Feldmagnete erzeugten magnetischen Linien den Ankerkern wirklich durchsetzten, der Rest zerstreute sich entweder zwischen den Polstücken durch die Luft oder durch die

Bodenplatte, oder er wendete sich von den Polstücken zu dem oberen Joch. Der Versuch ergab als Verhältnisszahl der magnetischen Strömung in den Eisenkernen (an einem Punkte in der Mitte der aufrecht stehenden Kerne) zur Strömung im Anker 1,32. Wir wollen dieses Verhältniss, wie schon oben geschehen, mit v bezeichnen¹⁾.

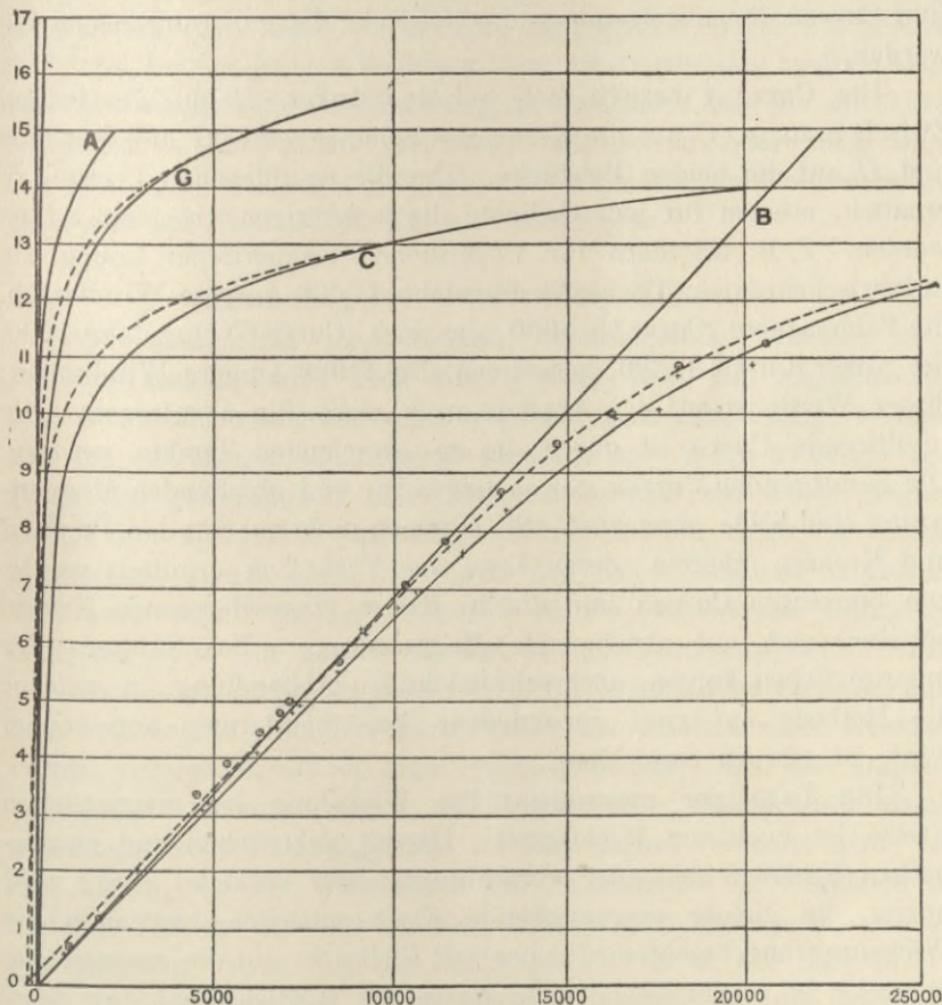


Fig. 94.

In der Versuchsmaschine befand sich ein oberes Joch, dessen gekrümmter Längsweg l_4 und dessen Querschnitt A_4 war. Die entsprechenden Grössen für die massiven Polstücke mögen l_5 und A_5 sein. Nach Einfügung dieser Werthe in die Gleichung erhält man:

$$l_1 f\left(\frac{\mathcal{C}}{A_1}\right) + 2l_2 \frac{\mathcal{C}}{A_2} + l_3 f\left(\frac{v\mathcal{C}}{A_3}\right) + l_4 f\left(\frac{v\mathcal{C}}{A_4}\right) + 2l_5 f\left(\frac{\mathcal{C}}{A_5}\right) = 4\pi AW/10.$$

1) Der Werth lässt sich durch einen Versuch bestimmen oder, wie später gezeigt werden wird, berechnen.

Diese fünf Ausdrücke, die fünf Curven ergeben, sind zu berechnen (Fig. 94). Ausserdem ist zu beachten, dass mit abfallenden magnetisirenden Kräften eine andere Curve der Magnetisirung erhalten wird, als mit ansteigenden magnetisirenden Kräften. Die der Abhandlung von Hopkinson entnommene Fig. 94 zeigt, wie die fünf Curven für ansteigende und abfallende Magnetisirung entworfen werden.

Die Curve *A* bezieht sich auf den Anker, *B* auf die beiden Zwischenräume, *C* auf die Kerne des Feldmagnetes, *G* auf das Joch und *H* auf die beiden Polstücke. Um die resultirenden Curven zu erhalten, müssen für jede Ordinate die zugehörigen Abscissen addirt werden. Z. B. erfordern für 12 Millionen magnetischer Linien die Luftzwischenräume (Curve *B*) ungefähr 17500 Ampere-Windungen, die Feldmagnete (Curve *C*) 5000, das Joch (Curve *G*) ungefähr 1000, der Anker (Curve *A*) 300, zusammen also 23000 Ampere-Windungen; dieser Werth ist auf der Abscisse nach rechts hin abzutragen. Die resultirende Curve ist durch die so berechneten Punkte gezogen. Die resultirenden Curven der ansteigenden und abfallenden Magnetisirung sind beide gezeichnet. Sie stimmen recht gut mit den Punkten und Kreuzen überein, deren Lage aus Versuchen ermittelt wurde. Die punktirtten Curven und die in Kreise eingeschlossenen Kreuze beziehen sich auf abnehmende Magnetisirung. Das Studium der ursprünglichen kurzen, aber sehr wichtigen Abhandlung, in welcher die Methode auf zwei verschiedene Maschinenformen angewendet wird, ist sehr zu empfehlen.

Die Lage der magnetisirenden Wickelung im magnetischen Kreise ist noch von Wichtigkeit. Da die elektrischen und magnetischen Kreise miteinander verschlungen oder verkettet sind, wird immer die gleiche magnetisirende Kraft entstehen, wo auch die Wickelung angebracht wird; aber mit Rücksicht auf die magnetische Streuung ist es vortheilhaft, die Wickelung möglichst nahe an demjenigen Theile des magnetischen Kreises anzubringen, wo die magnetisirende Kraft entstehen soll. Wie wir oben (Seite 112) gefunden haben, werden, wenn mehrere Wickelungen vorhanden sind, ihre magnetisirenden Kräfte sich nur summiren, wenn sie demselben magnetischen Kreise angehören; wenn also ein doppelter magnetischer Kreis angewandt wird (wie z. B. bei den Maschinen der Manchester-Gattung), muss jeder Zweig des Kreises mit genügenden Ampere-Windungen versehen werden, damit die verlangte magnetische Potentialdifferenz zwischen den Polen entsteht. Es kann

sonst unter gleichen Umständen in den Feldmagneten das Doppelte an Kraft und mehr verloren gehen. Da indessen der Umfang jedes der beiden Zweige geringer ist als wenn nur ein Kreis vorhanden wäre, so braucht man nicht ganz das Doppelte an Kupfer für die Wickelungen, um keinen grösseren Verlust als bei einer Wickelung zu erhalten. In Fällen, wo mehrere magnetische Kreise erforderlich sind, wie bei vielpoligen Feldmagneten, ist es zuweilen zweckmässig, nur eine magnetisirende Wickelung zu verwenden und sie mit allen magnetischen Kreisen zu verketten; eine solche Anordnung zeigt Fig. 425. Es wäre sogar möglich, den magnetischen Kreis mehrere Male um den elektrischen Kreis zu schlingen.

Streuung der magnetischen Linien.

Wo immer ein magnetisches Potentialgefälle zwischen zwei Punkten besteht, wird auch eine gewisse Zahl von magnetischen Linien von einem zum anderen übergehen, ganz gleichgültig, welcher Art das zwischen ihnen liegende Medium ist. Wenn zwischen den Polen des Feldmagneten einer Dynamomaschine ein hohes magnetisches Potentialgefälle aufrecht erhalten werden muss, so gehen magnetische Linien nicht nur durch den Anker, sondern in grosser Zahl auch durch die Luft von Pol zu Pol, sie werden sich auch nach der Seite hin ausbreiten und so ein Zerstreungsfeld bilden.

Man muss nicht vergessen, dass die magnetische Streuung aus dem Feldmagnet einer Dynamomaschine nur insofern einen Energieverlust verursacht, als sie eine Vergrösserung der Zahl der Ampere-Windungen bedingt, damit die magnetische Dichte und damit das magnetische Potentialgefälle im Feldmagnet vermehrt wird. In den Fällen, wo der Widerstand der Feldmagnete im Vergleich zu anderen Theilen des magnetischen Kreises sehr gering ist, schadet die Streuung wenig. In den Feldmagneten der in den Figuren 377 und 425 dargestellten Wechselstrommaschinen ist die Streuung ganz erheblich, aber das ist ohne Bedeutung, so lange die erforderliche magnetische Potentialdifferenz zwischen den Polen ohne unverhältnissmässigen Aufwand an Erregerstrom aufrecht erhalten werden kann.

Das Verhältniss der Menge der Linien des gesammten Feldes zu der Menge der nutzbar gemachten Linien nennt man den Streuungscoefficienten und bezeichnet ihn mit v . In der folgenden Tabelle sind die Werthe von v für verschiedene Maschinenarten angegeben.

Maschine	Feld	Anker	Bemerkungen	v
Edison-Hopkinson	zweipolig	Trommel	Pole nahe der Grundplatte	1,32
Amerikanische Edison	zweipolig	Trommel	desgl.	1,40
General Electric Co.	mehrpilig	Trommel	direct gekuppelt	1,25
Kapp	zweipolig	Trommel	Joch nahe der Grundplatte	1,30
Siemens	zweipolig	Trommel	desgl.	1,30
Manchester	zweipolig, doppelter Magnet	Langer Ring	Grundplatte und ein Pol aus einem Stück	1,49
Ferranti	vielpilig, doppelter Magnet	Kernlose Scheibe	Wechselstrommaschine	2,00

In jeder Maschinengattung nimmt der Streuungsfactor ab mit der Grösse der Maschine; z. B. nimmt er bei den zweipoligen Edisonmaschinen ab von 2,0 für die 100 Watt-Maschine bis herunter zu 1,2 bei der 300 Kilowatt-Maschine. Bei grossen vielpoligen Dynamomaschinen mit innenliegenden Polen variirt der Coëfficient von 1,5 bei der vierpoligen 2 Kilowatt-Maschine bis 1,15 bei einer 2000 Kilowatt-Maschine.

Das Streufeld um eine Maschine herum lässt sich durch die Bewegung einer Compassnadel im Felde erforschen. Eine Methode, die Wirkung in der Umgebung einer Dynamomaschine zu untersuchen, ist von Edser und Stansfield¹⁾ angegeben worden. Sie fanden, dass das zerstreute Feld unmittelbar hinter einem der Pole einer Kapp'schen zweipoligen Dynamomaschine einen Werth von ungefähr 300 C.-G.-S.-Einheiten hatte. In einer Entfernung von 125 mm betrug dieser Werth entlang einer horizontalen im rechten Winkel zu der Kernachse verlaufenden Linie nur noch 160, bei 250 mm 80, bei 500 mm 22 und bei 750 mm nur noch 5 Einheiten. In der Fig. 95 ist im Allgemeinen die Richtung der Kraftlinien angegeben, die sich von einer zweipoligen Maschine aus zerstreuen. Es ist zu bemerken, dass die Zerstreung auch in anderer Weise als von Pol zu Pol stattfindet. So z. B. herrscht bei den magnetischen Linien die Neigung, von den Polstücken nach dem Joch überzutreten. Steht die Maschine mit ihren Polen (wo die magnetische Potentialdifferenz am grössten ist) auf einer eisernen Grundplatte, so tritt hier starke Streuung auf, wenn die Maschine auch auf einem Fussgestell von Zink steht.

1) Electrician, Bd. 29, S. 118. 3. Juni 1892.

Hering¹⁾ hat viele Maschinen auf ihre magnetische Zerstreung geprüft und Zeichnungen der letzteren geliefert. Ein aussergewöhnlicher Fall des Streufeldes wird durch die Bogenlichtmaschine von Thomson-Houston (Fig. 311) geliefert. Es möge auch noch auf die Versuche von Carhart²⁾, Tweter³⁾, Wedding⁴⁾, Puffer⁵⁾, Mavor⁶⁾ und Wiener⁷⁾ hingewiesen werden.

Es ist klar, dass der Coëfficient der Streuung bei einer gegebenen Maschine nicht gleich bleibt, denn der Betrag der Streuung hängt von der Durchlässigkeit des Weges im Ankerkern und den Streuwegen ausserhalb der Maschine ab. Da nun die Durchlässigkeit der Luft gleich bleibt, diejenige der Eisenkerne mit Erreichung des

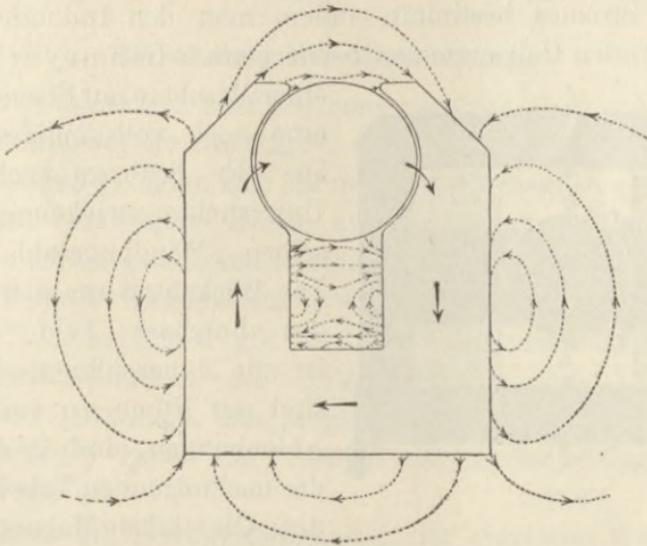


Fig. 95. Streufeld⁸⁾.

Sättigungsgrades aber abnimmt, so wächst die Streuung mit der stärkeren Erregung. Auch wenn ein starker Strom dem Anker entnommen wird, verursacht die entmagnetisirende Rückwirkung des Ankerstromes unmittelbar eine Streuung, weil im Wege der magnetischen Linien eine entgegengesetzte magnetomotorische Kraft ansteigt.

1) Electr. Rev., Bd. 21, S. 186 und 205. 1887.

2) Electr. Rev., Bd. 25, S. 286; und Electrician, Bd. 23, S. 644. 1889.

3) Journ. Inst. Electr. Engin., Bd. 19, S. 243. 1890.

4) Elektrotechnische Zeitschrift, Bd. 13, S. 67. 1892.

5) Electr. Rev., Bd. 30, S. 487. 1892.

6) Electr. Engin., Bd. 13, S. 428. 1894.

7) Electr. World, Bd. 24, S. 647, vom 22. Dezember 1894.

8) Das Streufeld ist von Herrn Dr. F. Niethammer in Berlin an einer Siemens & Halske'schen Maschine aufgenommen worden.

Da ausserdem die Streuung nicht auf die wirklichen Polen beschränkt ist, sondern in geringerem oder grösserem Grade über den ganzen Magnet hinweg stattfindet, so bedeutet der Streucoefficient nur eine Art von Durchschnittswerth.

Durch Versuche lässt sich der wirkliche Werth des Zerstreungsverhältnisses in verschiedenen Theilen der Maschine bestimmen. J. und E. Hopkinson führten diese Versuche an einer Manchester-Maschine¹⁾ mittels Untersuchungswicklungen aus.

Die Wicklungen wurden an verschiedenen Stellen um den Feldmagnet der Maschine gelegt. Die von ihnen eingeschlossene Anzahl von Kraftlinien wurde durch plötzliche Unterbrechung des erregenden Stromes bestimmt, indem man den Inductionsstrom in einem passenden Galvanometer beobachtete. Lahmeyer²⁾ stellte an einer Maschine mit Eisenumkleidung eine noch vollständigere Prüfung an. Er benutzte sechs einzelne Untersuchungswicklungen mit derselben Windungszahl (Fig. 96). Die Wicklung um den Anker, die das nutzbare Feld einschliesst, ist mit *A* bezeichnet, die anderen sind mit Nummern versehen. Die Ablenkungen sind in der Spalte 2 der nachfolgenden Tabelle verzeichnet. Die stärkste Magnetisirung fand er in der Wicklung 3. Gilt diese = 100, so giebt die Spalte 4 der Tabelle die Streuung in den übrigen Wicklungen nach Procenten an. Die Spalte 4 enthält die verschiedenen Magnetisirungen, wenn die Magnetisirung in *A* = 100 gesetzt wird. Die Jochtheile sind ersichtlich von ungenügender Stärke. Spalte 5 giebt die Werthe von *v* an.

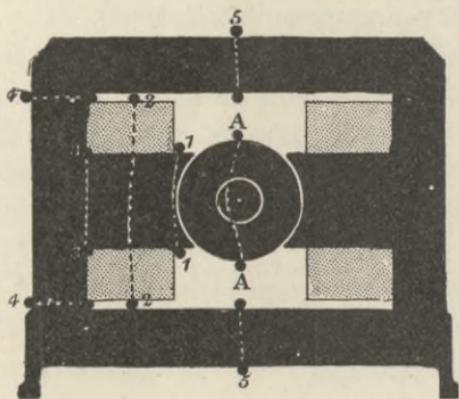


Fig. 96.

Hopkinson giebt für die Maschine von Edison-Hopkinson für *v* den Werth 1,32 an. Dies ist das beobachtete Verhältniss, wenn die Untersuchungswicklung in der Mitte der Magnetschenkel angebracht war und wenn sie um den Anker gelegt wurde. Zweifellos ist der Werth zu klein. Wäre die Untersuchungswicklung höher hinauf gelegt worden, und hätte man den Anker so erregt, dass er

1) Phil. Transact., Theil 1, S. 331. 1886. Electrician, Bd. 18, S. 39, 63, 86 und 175, November und Dezember 1886.

2) Elektrotechnische Zeitschrift, Bd. 9, S. 283. 1887.

eine entmagnetisirende Wirkung ausübte, so würde der Streucoefficient mindestens 1,4 betragen haben.

Wicklung	Ablenkung	Procente der Streuung, wenn die Magnetisirung in der Wicklung 3 = 100 ist	Magnetisirung, wenn diese in A = 100 ist	Werth von v
A	780	10,9	100	1,00
1	788,5	10,1	101	1,01
2	861	1,6	110	1,10
3	876	0	112	1,12
4	850	3,0	109	1,09
5	749	14,5	96	0,96

Berechnung der Zerstreuung.

Vor der Ausführung einer Dynamomaschine lässt sich der wahrscheinliche Betrag der Zerstreuung aus den Werkzeichnungen bestimmen. Die Berechnungen gründen sich darauf, dass die magnetische Strömung sich in einem verzweigten Kreise auf die einzelnen Wege im Verhältniss ihrer Leitungsfähigkeit vertheilt, ebenso wie ein elektrischer Strom sich beim Vorhandensein verschiedener Wege verzweigt. Das Gesetz des Nebenschlusses gilt auch für die magnetischen Linien. Man vergleiche hierüber die Untersuchungen von Ayrton und Perry¹⁾. Es folgt daraus, dass längs verzweigter Wege die gesammte Leitungsfähigkeit²⁾ gleich der Summe der Leitungsfähigkeiten der einzelnen Wege ist.

Sind daher die Leitungsfähigkeiten der einzelnen Wege für die nutzbare und die nutzlose magnetische Strömung in einer Dynamomaschine bekannt, so lässt sich der Coefficient v der Zerstreuung aus dem Verhältniss der gesammten Strömung zur nutzbaren Strömung berechnen. Ist die Leitungsfähigkeit für die nutzbare Strömung u und für die nutzlose w , so ist

$$v = \frac{u + w}{u}.$$

Jede der Grössen u und w ist aus mehreren gleichartigen zusammengesetzt, so dass die vollständige Formel lautet:

$$v = \frac{u_1 + u_2 + u_3 + \dots + w_1 + w_2 + w_3 + \dots}{u_1 + u_2 + u_3 + \dots}.$$

1) Journ. Soc. Electr. Engin. and Electr., S. 530. 1886.

2) Die Leitungsfähigkeit (auch magnetische Capacität genannt) ist der reciproke Werth des Widerstandes, ebenso wie dies für elektrische Leiter gilt.

Zur Bestimmung der einzelnen Leitungsfähigkeiten längs der verschiedenen Wege gehen wir auf einige von Forbes¹⁾ entwickelte Formeln zurück.

I. Leitungsfähigkeit zwischen zwei parallelen gegenüberstehenden Flächen (Fig. 97).

$$k = \frac{1}{2} \left(\frac{A_1 + A_2}{d} \right).$$

II. Leitungsfähigkeit zwischen zwei gleichen rechtwinkligen, in derselben Ebene liegenden Flächen (Fig. 98).

Es wird angenommen, dass die Linien in der Luft in Halbkreisen verlaufen.

$$k = \frac{a}{\pi} \log \text{nat} \frac{d_2}{d_1}.$$

III. Leitungsfähigkeit zwischen zwei gleichen rechtwinkligen parallelen, in derselben Ebene liegenden Flächen. Angenommen wird,

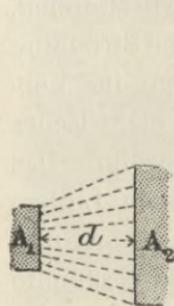


Fig. 97.

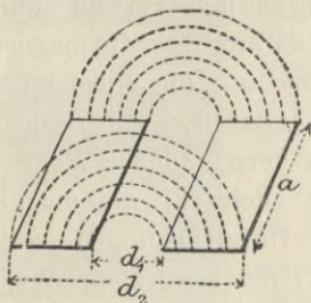


Fig. 98.

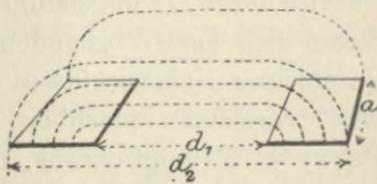


Fig. 99.

dass die Linien in der Luft in Viertelkreisen verlaufen, die durch gerade Linien verbunden sind (Fig. 99).

$$k = \frac{a}{\pi} \log \text{nat} \left(1 + \frac{\pi(d_2 - d_1)}{d_1} \right).$$

IV. Leitungsfähigkeit zwischen zwei gleichen rechtwinklig zu einander liegenden Flächen.

Die Leitungsfähigkeit beträgt das Doppelte der nach II berechneten Werthe.

In diesen Formeln sind a_1 , d_1 und d_2 in Centimetern, A_1 und A_2 in Quadratcentimetern auszudrücken.

Wenn man diese Regeln zur Vorherbestimmung der Zerstreung durch die Schwunräder, Gestelle und Achsen anwendet, ist man im Stande, aus den Werkzeugzeichnungen das Ergebniss bis auf 2 Procent anzugeben.

1) Journ. Soc. Telegr. Engin., Bd. 15, S. 551. 1886.

Der Verfasser hat in seinem Werke: »Der Elektromagnet« noch einige weitere Regeln gegeben, welche auch die Streuung zwischen zwei parallelen Cylindern behandeln.

In der 4. Ausgabe des vorliegenden Werkes war auch ein ausführliches Beispiel der Anwendung dieser Regeln auf die Streuung einer ausgeführten Dynamomaschine gegeben.

Kapitel VIII.

Formen der Feldmagnete.

Unter Zuhilfenahme des leitenden Grundsatzes vom magnetischen Kreise bieten sich nur geringe Schwierigkeiten für die Beurtheilung des Werthes der verschiedenen Bauarten der Feldmagnete; man muss festhalten, dass der magnetische Kreis von höchster Durchlässigkeit eine möglichst gedrungene Gestalt, möglichst grossen Querschnitt, das weichste Eisen und möglichst wenige Verbindungsstellen erfordert. In manchen Fällen muss indessen der Feldmagnet gleichzeitig den Rahmen der Maschine bilden, an dessen Bauart andere Bedingungen gestellt werden. Ferner ist es theoretisch besser, wenn bei einer einfachen zweipoligen Maschine nur ein magnetischer Kreis vorhanden ist, als wenn deren zwei bestehen (vergl. S. 140); in manchen Fällen ist indessen baulicher Gründe halber ein doppelter magnetischer Kreis vorzuziehen.

Der doppelte Kreis — wie er z. B. in den Formen Nr. 3 und 8 der Fig. 100 erscheint, besitzt im Allgemeinen den Vortheil, dass er ein festeres Gestell giebt und dass sein magnetisches Feld symmetrischer als das Feld Nr. 2 ist. Bei der Betrachtung der abgebildeten Formen sind diese Punkte wohl in Betracht zu ziehen. Nr. 1 zeigt die von Wilde zum Gebrauch für den Anker mit Längswicklung von Siemens benutzte Form. Zwei Eisenplatten werden an einem Ende durch ein Joch verbunden, am anderen Ende mit zwei massiven Polstücken verbolzt. Es sind demnach vier Verbindungsstellen vorhanden, ausserdem die Zwischenräume am Anker; das Joch ist unzureichend. Nr. 2 zeigt die bei den zweipoligen Maschinen von Edison (Normalmuster) verwendete Form. Die aufrecht stehenden Kerne werden von starken Cylindern gebildet. Das Joch ist ungewöhnlich dick, die Polstücke sind massiv, die unteren Ecken sind abgeschnitten. Verbindungsstellen sind ebenso viele als bei der Wilde'schen Form vorhanden; jedoch wird ein solcher Kreis mit Rücksicht auf den grösseren Querschnitt eine weit höhere magnetische

Leitungsfähigkeit als der Wilde'sche Kreis besitzen. Eine Schwierigkeit bietet die Frage, wie man einen solchen Kreis zweckmässig auf einer Bodenplatte befestigen soll. Erfolgt die Befestigung auf einer Eisenplatte, so wird ein beträchtlicher Theil des Magnetismus vom Anker abgelenkt und durch die Platte kurz geschlossen, wie im vorhergehenden Kapitel gezeigt worden ist. Bei der grösseren, von Edison benutzten Form Nr. 10 ist die Schwierigkeit durch Umliegung der Magnete nur theilweise gehoben.

Eine bevorzugte Form des Feldmagnetes mit doppeltem magnetischen Kreise und mit Folgepolen ist in Nr. 3 dargestellt; diese Form hat Gramme eingeführt. Man darf sie als eine Vereinigung von zwei Formen Nr. 1 mit gemeinschaftlichen Polstücken ansehen. Die Nummern 3 bis 9 beruhen auf verschiedener Ausführung ein und derselben Idee. Nr. 4 zeigt im Grundriss die bei der Maschine von Brush angewendete Form; die beiden magnetischen

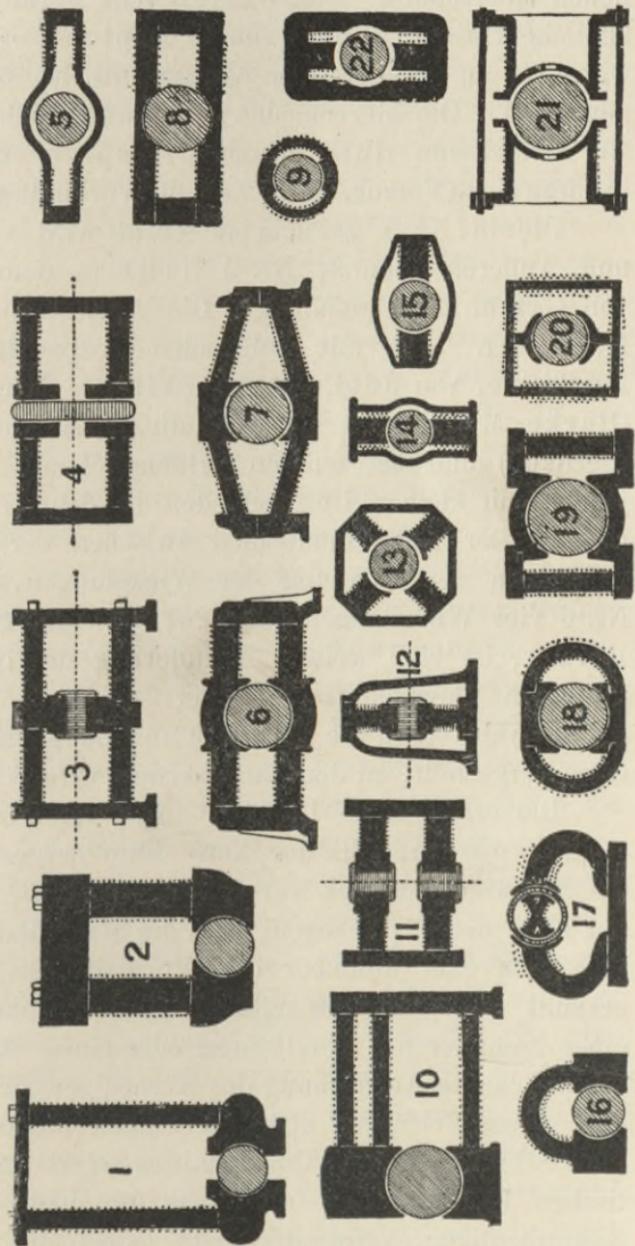


Fig. 100.

Kreise werden durch den Ringanker von einander getrennt. Die Darstellung kann auf viele Formen der Flachringmaschine bezogen werden; jedoch werden bei den meisten derselben die Pole zu beiden Seiten des Ringes mittels eines gemeinschaftlichen hohlen Polstückes verbunden,

letzteres umfasst einen Theil des Ringumfanges. Nr. 5 stellt die alte Siemens'sche Form mit gebogenen schmiedeeisernen Stäben und mit Folgepolen in der Wölbung dar. Dieser Kreis besitzt einen unzulänglichen Querschnitt. Die Weston'sche Form ersieht man aus Nr. 6, ähnliche Formen wurden von Crompton, sowie von Paterson und Cooper angewendet; der Querschnitt ist bei dieser Bauart eher genügend. Die hiervon sich nicht wesentlich unterscheidende Form Nr. 7 wird von Bürgin und Crompton angewendet. Sie besitzt insofern einen Vorzug, als die Zahl der Verbindungsstellen vermindert ist.

Die in Nr. 8 gezeichnete Form wird von Crompton, Kapp und Anderen benutzt, Nr. 9 findet in dem kleinen Elektromotor von Griscom Verwendung. Die Abänderung in Nr. 18 rührt von Kapp her. Die mit Folgepolen ausgestattete Nr. 19 wird von Mc Tighe, von Joel, von Hopkinson (Manchester-Maschine), von Clarke, Muirhead & Co. (Westminster-Maschine), von C. E. L. Brown (Oerlikon) und bei einigen Triebmaschinen von Sprague benutzt, jedoch mit kleinen Unterschieden in den Verhältnissen der Einzeltheile. Der Hauptunterschied zwischen der Nr. 19 und der Nr. 6 besteht in der Lagerung der Wickelungen, Nr. 19 erfordert zwei, Nr. 6 vier Wickelungen. Nr. 20, nach der Bauart von Elwell und Parker, ist eine weitere Abänderung der Nr. 3 und würde durch grösseren Querschnitt verbessert werden. Bei der Form Nr. 3 (Gramme) werden die Polstücke und Endplatten gewöhnlich aus Guss-eisen hergestellt, zu den Längskernen wird Schmiedeeisen verwendet.

Die erforderliche Polfläche muss durch irgend welche Mittel gewonnen werden; falls der Kern dünn hergestellt ist, wird entweder ein massives Polstück verwendet (Nr. 1, 3, 4, 6, 7, 19, 20) oder der Kern derartig gebogen, dass die Seitenfläche als Pol dient. Nachdem man aber nunmehr den Vortheil, den massige Kerne bieten, erkannt hat, kann die nöthige Polfläche ohne Hinzufügung irgend einer besonderen Verbreiterung oder eines »Ansatzes« lediglich durch entsprechende Ausformung des Kernes gewonnen werden (Nr. 8). Man darf dieses Verfahren nicht als Schmälerung des Magnetes betrachten; eine Schmälerung des Querschnittes irgend eines Theiles des magnetischen Kreises würde allerdings die magnetische Leitungsfähigkeit beeinträchtigen, vermindert man jedoch die Stärke, um den Anker besser in den Schliessungskreis zu bringen, so erlangt man die entgegengesetzte Wirkung. Die horizontalen Leisten könnten oberhalb und unterhalb des Ankers in ihrer Mitte thatsächlich im Querschnitt beschränkt werden, soweit bauliche Rücksichten es zulassen. Bei

allen solchen Formen mit doppeltem magnetischen Kreise kann man annehmen, dass jede Hälfte des Feldmagnetes für sich die entsprechende Zahl magnetischer Linien durch den Anker sendet. Die Nummern 11 bis 15 zeigen Feldmagnete mit Polen, die man zum Unterschiede von Folgepolen vorspringende Pole nennen kann. Nr. 11 entspricht der Doppelmaschine nach Gramme von Deprez. Die Nummern 12 und 13 sind zwei der zahlreichen von Gramme selbst herrührenden Muster. Beide Feldmagnete werden aus Gusseisen hergestellt; die Nr. 13 hat keine Verbindungsstellen, sondern ist aus einem Stück gegossen. Nr. 14 wird von Hochhausen verwendet; praktisch ist diese Form gleich der Nr. 21, abgesehen von der Lage der Drehungsachse. Die eisernen Seitentheile der Nr. 14 begünstigen wegen ihrer nahen Lage zu den Polen die Bildung eines gewissen magnetischen Kurzschlusses; auch ist der Querschnitt unzulänglich. Aehnlich verhält sich die von Van de Poele angewendete Nr. 15. Nr. 16 besteht aus einem Gussstück und wurde vom Verfasser für kleine Triebmaschinen benutzt. Durch die Halbkreisform des Kernes sollte die Länge des magnetischen Kreises auf das geringste Maass beschränkt werden. Nr. 17 hat vorspringende Pole, welche durch andere Elektromagnete im Anker verstärkt werden. Nr. 21 zeigt den Schnitt der doppelten Röhrenmagnete der Maschine von Thomson-Houston; der kugelförmige Anker wird, ebenso wie der Anker in den Nummern 12, 14 und 15, zwischen die beiden vorragenden Pole gebracht.

Eine eigenthümliche Uebereinstimmung besteht bei den Nummern 21 und 19, hingegen unterscheiden sie sich wieder durch die Lage der Wickelungen. Von Kapp stammt die Nr. 22 mit zwei vorragenden Polen gleicher Polarität und zwei Folgepolen zwischen diesen; ein Paar Wickelungen genügt zur Magnetisirung des gesammten vierfachen Kreises. Beinahe gleiche Formen wurden von Kennedy in der Eisenmantel-Maschine, Nr. 25, Fig. 101, verwendet. Lahmeyer und Wenström verwenden Eisenmantelformen wie Nr. 15. Die Form von Wenström besitzt als Joch einen äusseren Eisencylinder.

Die Nr. 23, Fig. 101, wurde schon früher von Sawyer und von Lontin benutzt, kam aber neuerdings wieder in Aufnahme und wurde fast gleichzeitig von Gramme (Type supérieur), von Kapp, von Siemens (»H«-Form) und von Anderen angewendet. Nr. 24 zeigt die sehr massive Form von Brown. Nr. 26 wurde von Professor Forbes entworfen. Das Eisengerüst besteht aus zwei Theilen; die gänzlich umschlossenen Wickelungen sind so gelagert, dass sie den Anker unmittelbar magnetisiren, die eine Spule nimmt den ganzen verfügbaren Raum

zwischen Feldmagnet und der oberen Ankerhälfte ein, die zweite denselben Raum in der unteren Hälfte. Nr. 27 entspricht der vierpoligen Form, die von Ellwell und Parker bei einigen ihrer grösseren Maschinen verwendet wurde. Die vierpolige Form Nr. 28 wird von Wilde, Gramme u. A. benutzt, die den Ring umgebenden Pole haben abwechselndes Vorzeichen.

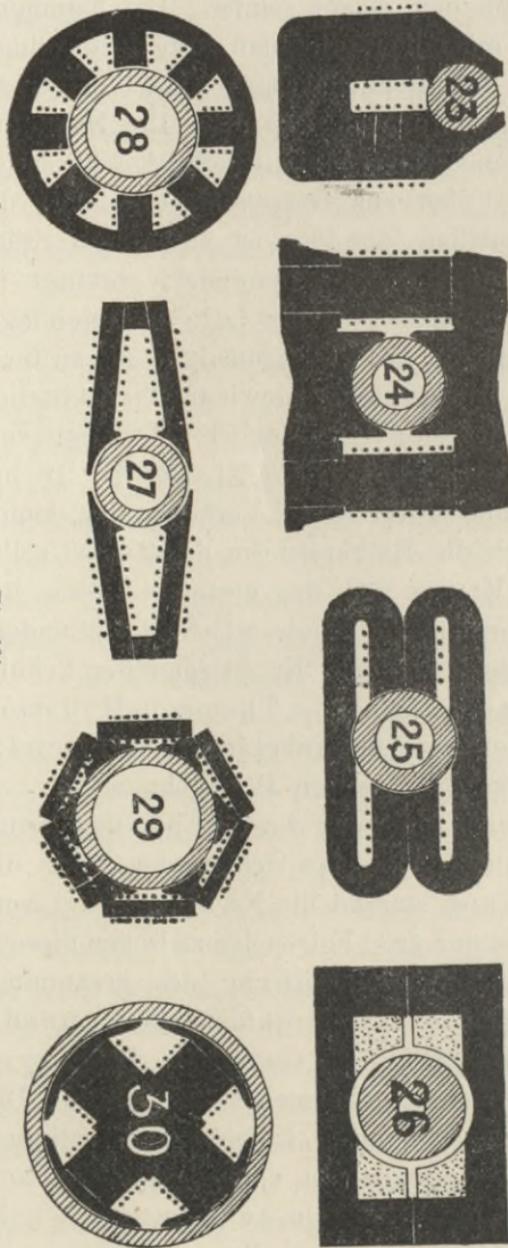


Fig. 101.

Gegenwärtig wird sie vielfach bei Wechselstrommaschinen verwendet, z. B. bei den Maschinen von Westinghouse, Mather und Platt (Hopkinson) und von Anderen. Die Form von Thury in Nr. 29 ist eine Abänderung der vorstehend genannten und zur Verwendung bei einer Maschine mit Trommelanker bestimmt. Die sechs nach innen gerichteten Pole werden durch Wicklungen magnetisirt, die auf dem äusseren sechsseitigen Gestell liegen. Nr. 30 zeigt die neuerdings von Siemens & Halske verwendete Form; bei derselben läuft ein Ring ausserhalb eines sehr gedrängt und stark gebauten vierpoligen Elektromagnetes um. Aehnliche sechspolige Maschinen wurden

von Ganz, Fein und Anderen erbaut und werden in Deutschland für grosse Centralstationen viel verwendet.

Nr. 31 stellt eine andere neuere Form eines Feldmagnetes aus einem einzelnen Hufeisen mit einer Wicklung dar. Dieselbe wurde vom Verfasser dieses Werkes zu Anfang 1886 angegeben und ist

sehr viel von Goolden & Comp., von Greenwood und Batley und anderen englischen Constructeuren benutzt worden. Die Eisenmantelform in Nr. 32 ist gleichfalls für eine Maschine mit einer Wickelung bestimmt. Sie wurde von Mc Tighe im Jahre 1882 hergestellt, neuerdings wieder von Stafford und Eaves benutzt. Ein neues Muster von Mordey für die Brush Company ist der Nr. 32 äh-

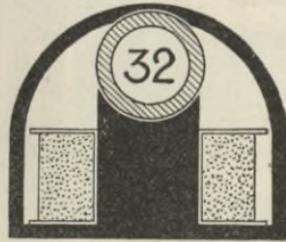
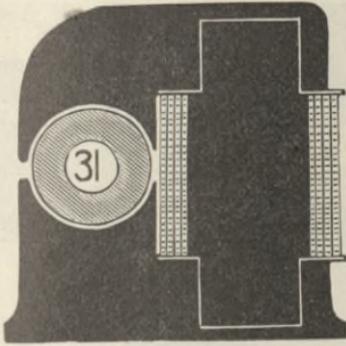


Fig. 102 und 103. Typische Formen von Feldmagneten.

lich, besitzt indessen einen äusseren Eisencylinder zur Umschliessung der Kerne.

Die Fig. 96 stellt die Form des Feldmagnetes von Lahmeyer dar; derselbe besitzt gleichfalls nach innen gerichtete Pole; wie die vorige, gehört sie zu den »Eisenmantel-Maschinen, da die Magnetjoch aussen liegen.

In der Maschine von Eickemeyer (Fig. 104) ist die Anregung von Forbes, die magnetisirenden Wickelungen über den Anker zu legen, verwirklicht worden. Die auf besondere Formen gewundenen Wickelungen werden in Nuthen zwischen dem oberen und unteren Joch und den nach einwärts vorragenden Polstücken eingepasst. Die Fig. 105 zeigt die innere Anordnung, nachdem eins der Polstücke abgenommen worden ist. Schwierig bleibt es bei derartigen Maschinen, den dicht umschlossenen Anker zu lüften.

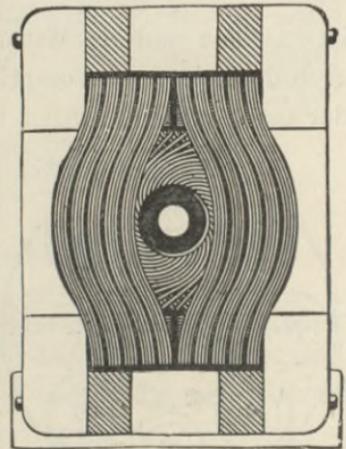


Fig. 104.
Eickemeyer'sche Maschine.

Eine besondere Form von Feldmagneten für Wechselstrommaschinen wurde von Wilde eingeführt und von Siemens, Ferranti und Anderen benutzt. Diese Form besitzt zwei Polkränze; entgegengesetzte Pole stehen sich gegenüber, Fig. 106.

Die Fig. 107 zeigt einen vierpoligen Feldmagnet für die Victoria-Maschine (Mordey) der Brush Company; es sind doppelte magnetische Kreise und Folgepole vorhanden. Die zur Aufnahme der Wickelungen

bestimmten Kerne bestehen aus Schmiedeeisen, während die Endgestelle und Polstücke gegossen sind.

Der vierpolige Magnet von Brown in Oerlikon, der in einigen grossen Maschinen für 300 P zur Arbeitsübertragung verwendet wird,

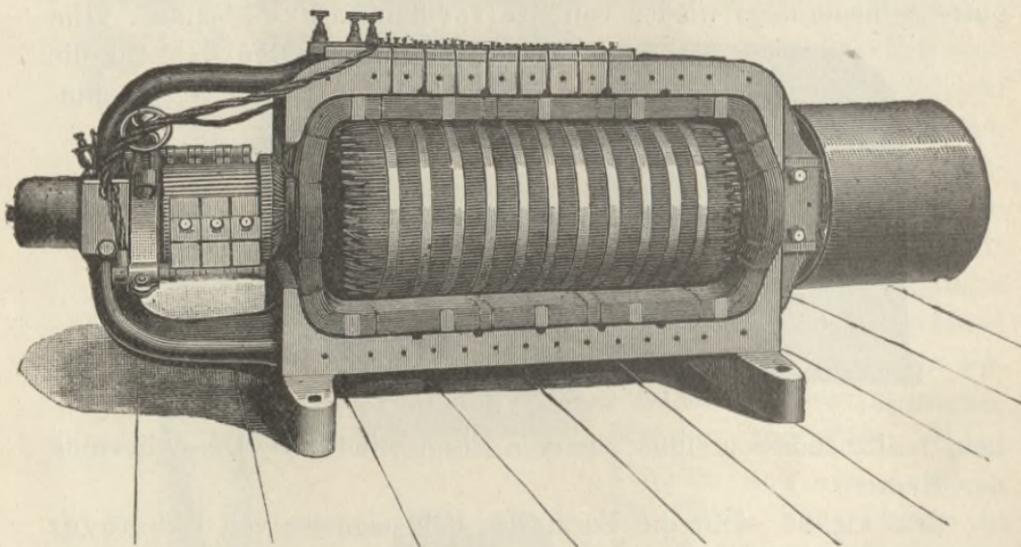


Fig. 105. Eickemeyer'sche Maschine

ist in ganz anderer Weise geformt. Er ist ganz aus Gusseisen hergestellt und besitzt vorspringende Pole. In der Fig. 108 ist der Verlauf der magnetischen Linien in diesen Magneten durch Pfeile bezeichnet.

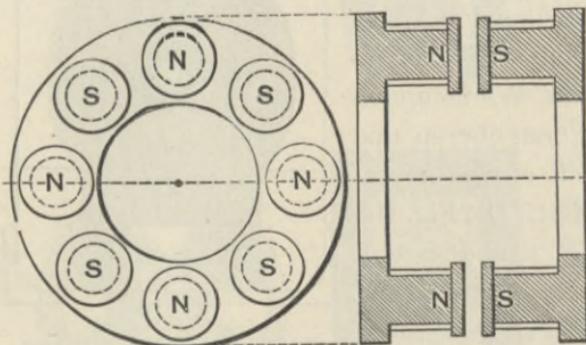


Fig. 106. Vielpoliges Feld für Wechselstrommaschinen.

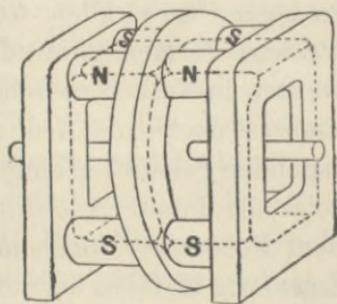


Fig. 107. Mehrpoliges Feld für Gleichstrommaschinen.

Die bemerkenswertheste Abweichung von den Formen der Feldmagnete bildet der in neuerer Zeit von Mordey für eine Wechselstrommaschine hergestellte Magnet (vergl. Tafel XIV). Obgleich derselbe nur einen magnetischen Kreis mit einer erregenden Wicklung besitzt, so gehört er doch zu den vielpoligen. Dieses Ergebniss wird durch die Anwendung verzweigter Polstücke erreicht, mittels deren

die magnetische Strömung in eine Anzahl besonderer magnetischer Felder zerlegt wird.

Die von Brown entworfene und für die Arbeitsübertragung von Lauffen nach Frankfurt bestimmte dreiphasige Wechselstrommaschine (vergl. Fig. 422 und 425) gehört ebenfalls zu der verbesserten Form mit einer einzigen erregenden Wickelung. Bei vielen neueren Maschinen findet man eine ähnliche Vereinfachung.

Bei einer so grossen Zahl von Entwürfen entsteht die Frage nach der besten Bauart; indessen ist die für einen bestimmten Zweck beste nicht für alle Zwecke zu gebrauchen. Einige Entwürfe lassen sich passend in Gusseisen ausführen, andere in Schmiedeeisen; wieder andere, z. B. die in den Fig. 102 und 107 angegebenen, sind eigens zur Zusammensetzung bestimmt, sie zeigen schmiedeeiserne Kerne für die Wickelungen und Gussstücke für die Polmassen. Es ist, wenn möglich, wünschenswerth, einen cylindrischen Kern zu verwenden, da diese Form den geringsten Umfang bei gegebenem Querschnitt besitzt und daher sowohl eine Ersparniss an Kupferdraht als auch überhaupt eine Vereinfachung der Wickelung bietet. Natürlich sind cylindrische Kerne nicht für Maschinen mit langen Trommelankern passend. Gegenwärtig herrscht das Bestreben vor, für die Wickelungskerne ein Material von hoher Durchlässigkeit zu wählen, um durch die dadurch mögliche Verkleinerung des Umfangs eine Ersparniss an Kupfer und Eisen zu erzielen. Da die Wickelungen gewöhnlich auf besondere Hülsen gewickelt werden, muss die Form des Magnetgestelles ein bequemes Auf- und Abnehmen der Wickelung gestatten. Für kleine Maschinen ist ein einfacher Kreis jedenfalls zu empfehlen. Für grosse Maschinen wird es nothwendig, mehrere Polpaare zu verwenden, für Wechselstrommaschinen sind die Vielfachformen zur Erlangung einer hinreichenden Wechselzahl der Ströme unvermeidlich.

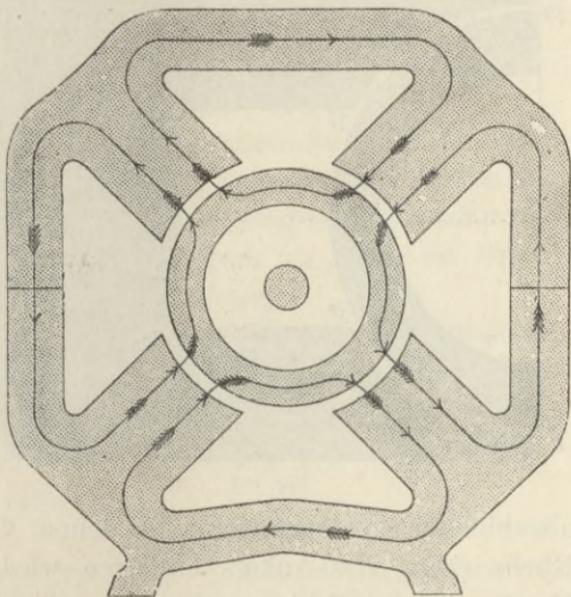


Fig. 108. Mehrpoliges Feld nach Brown.

Die Zukunft wird wahrscheinlich eine allgemeine Vereinfachung der vielpoligen Formen durch Anwendung verzweigter magnetischer Kreise herbeiführen.

Die Berechnung von Formen mit doppelten oder vielfachen magnetischen Kreisen wird in der Regel dadurch einfacher, dass man einen Theil des Ganzen betrachtet und auf diesen die Berechnung anwendet. Wie z. B. Fig. 109 darstellt, auf der die Hälfte einer Maschine mit dem Feldmagnet Nr. 8 der Fig. 100 abgebildet ist, genügt es, wenn man den magnetischen Widerstand dieser Hälfte be-

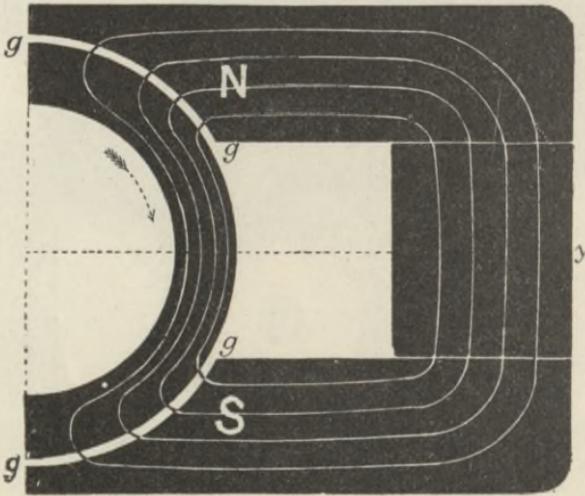


Fig. 109.

rechnet, um die Zahl der erforderlichen Ampere-Windungen zu bestimmen, die gleiche Zahl würde dann auf der andern Hälfte aufzubringen sein.

Formen mit doppeltem magnetischen Kreise sind solchen mit einfachem magnetischen Kreise in allen Fällen vorzuziehen (z. B. den unter Nr. 2, 23 und 31 abgebildeten Feldmagneten), in denen wahrscheinlich eine stärkere Rückwirkung des Ankers eintreten wird. In solchen Formen, wie Nr. 23, ist das Feld zwischen den oberen Polspitzen schwächer als zwischen den unteren Polflächen, demzufolge besteht eine kräftige Anziehung am unteren Theile des Ankers. Die Ungleichförmigkeit des Feldes bedingt im Weiteren, dass die quermagnetisierende Kraft des Ankers eine ungleichmässige Verzerrung des Feldes herbeiführt. Als bestimmte Folge davon tritt Funkenbildung an den Bürsten auf. Bei stark zu belastenden Ankern ist es nicht nur rathsam, doppelte Magnete zu verwenden, sondern auch die beiden Hälften durch ein Messingstück zu trennen.

Kapitel IX.

Elementare Theorie der Dynamomaschine. Magneto-Maschinen und besonders erregte Maschinen. Reihenmaschinen. Nebenschluss- maschinen.

Die Erfahrung hat gelehrt, dass die wichtigsten Aufgaben, welche bei dem Entwurfe von Maschinen in Frage kommen, am besten in der Weise ihre Lösung finden, dass man den magnetischen Kreis der Maschine als ein Ganzes und den Kern im Anker als einen wesentlichen Bestandtheil jenes Kreises auffasst.

Der Anker wird in dem Folgenden lediglich als eine gewisse Zahl N von Leitern betrachtet, die in besonderer Weise um die Drehungsachse angeordnet sind, und deren Aufgabe es bildet, eine bestimmte Menge magnetischer Kraftlinien, die dem magnetischen Kreise entstammen, zu schneiden.

Das Zeichen \mathcal{S} bedeutet bei zweipoligen Maschinen die gesammte Menge der magnetischen Kraftlinien, die den Anker durchsetzen, indem die Linien auf der einen Seite eintreten und den Anker auf der anderen verlassen. Einige bezeichnen dies als »gesammte Induction« »gesammte Magnetisirung« im Anker, Andere als »gesammte magnetische Strömung«. Bei vielpoligen Maschinen bezieht sich der Werth \mathcal{S} auf einen der besonderen magnetischen Kreise.

Die Zahl der Umläufe des Ankers in der Secunde wird durch den Buchstaben n bezeichnet.

Man findet, dass die vom Anker erzeugte durchschnittliche elektromotorische Kraft einfach proportional jeder der drei genannten Grössen ist, so dass wir bei der Wahl geeigneter Einheiten als Grundgleichung aufstellen können:

$$E \text{ (im Durchschnitt)} = nN\mathcal{S} \dots \dots \dots \text{ (I).}$$

Im vorliegenden Kapitel wird zunächst ein Ausdruck für die durchschnittliche Grösse der elektromotorischen Kraft gefunden; dieser

Ausdruck dient als Grundgleichung für alle Maschinen. Durch Einführung von Näherungsformeln für die verschiedenen Kreise werden dann Gleichungen für die verschiedenen Arten der Reihenmaschinen, Nebenschlussmaschinen und Verbundmaschinen hergeleitet werden.

Bezeichnungen.

In diesem und den folgenden Kapiteln finden die nachstehenden Buchstaben für die angegebenen Bezeichnungen Verwendung:

- A* Fläche in Quadratecentimetern.
- \mathfrak{B} Magnetische Induction oder Anzahl der magnetischen Linien auf das Quadratcentimeter im Eisen, magnetische Dichte.
- b* Anzahl der äusseren Drähte in einer Abtheilung des Ankers. Bei Wechselstrommaschinen bezeichnet *b* den Breiten-Coëfficienten (vergl. Kap. XXIII).
- β Winkelweite (Bogenlänge) d. Ankerabtheilung od. des Stabes d. Stromabgebers.
- c* Anzahl der Stäbe am Stromabgeber oder Stromwender.
- D* Drehungsmoment oder statisches Moment in Dyne-Centimeter, Gramme-Centimeter, Kilogramm-Meter, je nach Umständen.
- E* Gesammte in einem Anker erzeugte elektromotorische Kraft, $\left. \begin{array}{l} \varepsilon \text{ Potentialdifferenz (Spannung) zwischen den Bürsten,} \\ e \text{ Potentialdifferenz (Spannung) zwischen den Endklemmen,} \\ \mathcal{E} \text{ Elektromotorische Kraft einer äusseren Hilfsquelle,} \end{array} \right\} \text{ in Volt.}$
- η Oekonomischer Coëfficient od. Güteverhältniss (vgl. S. 101 u. 175, sowie Kap. XXX).
- F* Kraft, ausgedrückt in Dynen oder Grammgewicht.
- \mathfrak{F} magnetisirende Kraft.
- \mathfrak{H} Magnetische Feldstärke (Linien für das Quadratcentimeter in der Luft), magnetische Kraft.
- i* Stromstärke im äusseren Kreise, $\left. \begin{array}{l} ia \text{ Stromstärke im Anker,} \\ is \text{ Stromstärke im Nebenschlusse,} \\ im \text{ Stromstärke in der Reihenwicklung des Feldmagnetes,} \end{array} \right\} \text{ in Ampere.}$
- L* Coëfficient der Selbstinduction.
- λ Durchschnittslänge einer Windung in einer Wickelung (auch zur Bezeichnung des Verschiebungswinkels benutzt).
- μ Coëfficient der magnetischen Durchlässigkeit des Eisens.
- N* Anzahl der Ankerleiter, um den äusseren Umfang herum gezählt.
- n* Zahl der Umläufe in der Secunde, bei Wechselstrommaschinen Zahl der Perioden in der Secunde.
- ω Winkelgeschwindigkeit (in Radianen in der Secunde).
- P, p* Leistung oder Arbeit in der Secunde in Watt oder Pferdestärken.
- p* Zahl der Polpaare; bei Wechselstrommaschinen Zahl der Perioden in 2π Secunden: $p = 2\pi n$.
- R* Widerstand des äusseren Stromkreises, $\left. \begin{array}{l} ra \text{ Widerstand der Ankerwickelungen,} \\ rs \text{ Widerstand der Nebenschlusswickelungen,} \\ rm \text{ Widerstand der Reihenwicklung des Feldmagnetes,} \\ r \text{ Innerer Widerstand einer Maschine} = ra + rm \text{ oder} = ra + rs, \\ \rho \text{ Widerstand für die Längeneinheit,} \end{array} \right\} \text{ in Ohm.}$

- S* Zahl der Drahtwindungen in der Feldmagnetwicklung, die mit der Ankerwicklung in Reihe geschaltet sind. Im Allgemeinen auch Anzahl der Windungen.
- ⊗ Zahl oder Menge der magnetischen Kraftlinien, die durch den Ankerkern treten, Magnetisirung.
- T* In der Abtheilung über Wechselstrommaschinen: Periode des Wechselstromes in Secunden gemessen.
- t* Zeit in Secunden.
- v* Coëfficient der magnetischen Zerstreuung.
- V* Spannung an den Klemmen einer Dynamomaschine oder eines Elektromotors in Volt.
- Z* Anzahl der Drahtwindungen in der Nebenschlusswicklung eines Feldmagnetes.
- φ Winkel der Phasenverschiebung bei Wechselströmen.

Grundgleichung der Dynamomaschine.

Zur Bestimmung der durchschnittlichen elektromotorischen Kraft eines sich bewegenden Leiters benutzen wir die Erläuterung S. 24, wonach die Kraft in Einheiten des C.G.S.-Systemes numerisch durch die Zahl der Kraftlinien auszudrücken ist, die in einer Secunde von dem Leiter geschnitten werden. Da die praktische Einheit — das Volt — gleich 10^8 absoluten C.G.S.-Einheiten der elektromotorischen Kraft ist, so hat man zur Bestimmung der Anzahl Volt die Zahl der C.G.S.-Einheiten durch 10^8 zu dividiren. Wenn ferner, wie dies bei Maschinenankern zutrifft, eine Anzahl von Leitern hintereinandergeschaltet ist, so ist die gesammte elektromotorische Kraft der Dynamomaschine gleich der Summe der elektromotorischen Kräfte in jenen Leitern, die sich in Reihenschaltung befinden.

Die Grundgleichung lautet dann:

$$E \text{ (im Mittel)} = nN\mathcal{C} : 10^8 \text{ (Volt)} \dots \dots \text{ (Ia).}$$

Wir wollen eine gewöhnliche zweipolige Maschine mit einem Ankerkern behandeln, für den die Zahl der Abtheilungen mit *c* bezeichnet werde; die Anzahl der Theile oder Stäbe am Stromwender oder Stromabgeber wird demnach ebenfalls gleich *c* sein. In jeder Abtheilung sollen sich *b* äussere Drähte oder Leiter befinden; die Leiter werden an der Aussenseite des Ankerkernes gezählt. (In Ringankern wird sich eine gleiche Zahl äusserer Leiter, wie die Abtheilung Schleifen oder Windungen besitzt, vorfinden; in Trommelankern sind doppelt so viel äussere Drähte als Schleifen oder Windungen in der Abtheilung vorhanden.)

Die um den Anker gezählte Zahl Leiter oder Drähte wird demnach bc sein, wir setzen hierfür N . Die Zahl der äusseren Leiter oder Drähte, die sich von Bürste zu Bürste in Reihenschaltung befinden, ist gleich $\frac{bc}{2}$ oder $\frac{1}{2}N$.

Der Anker möge n Umläufe in der Secunde machen. (Der Ingenieur rechnet gewöhnlich die Umdrehungen für die Minute und erhält dann durch Division mit 60 unseren Werth n .) Eine Umdrehung beansprucht demnach $\frac{1}{n}$ Secunde. Die Berechnung der elektromotorischen Kraft stellt sich nun wie folgt:

Anzahl der von einem äusseren Leiter während eines Umlaufes geschnittenen Linien	= $2\mathcal{C}$
(Jeder Draht schneidet sämmtliche Linien, wenn sie auf der einen Seite des Ankers eintreten, und wenn sie auf der anderen wieder austreten.)	
Anzahl der von einem äusseren Draht in einer Secunde geschnittenen Linien	= $2n\mathcal{C}$
Anzahl der von $\frac{1}{2}N$ äusserer Drähte (in Reihe geschaltet) in einer Secunde geschnittenen Linien	= $2n\mathcal{C} \cdot \frac{1}{2}N$ = $nN\mathcal{C}$
Mittlere elektromotorische Kraft (in C. G. S.-Einheiten)	= $nN\mathcal{C}$
Mittlere elektromotorische Kraft (in Volt)	= $\frac{n \cdot N \cdot \mathcal{C}}{10^8}$ (Ia).

Die Zufügung des Divisors 10^8 ist nicht in jedem Falle erforderlich, weil es sich leicht dem Gedächtniss einprägt, dass bei Auslassung der Zahl man den erhaltenen Werth einfach auf Volt zurückführen kann.

Eine auf der Winkelgeschwindigkeit beruhende Grundgleichung ist für manche Zwecke sehr bequem. Sei ω die Winkelgeschwindigkeit, so ist

$$\omega = 2\pi n,$$

denn bei jeder Umdrehung wird der beschriebene Winkel 2π Radian (Radius als Längeneinheit gesetzt) oder 360 Grad betragen. Daraus

folgt
$$n = \frac{\omega}{2\pi}$$

und

$$E \text{ (im Durchschnitt)} = \frac{\omega}{2\pi} N\mathcal{C} \quad . . . \quad \text{(Ib).}$$

Zu beachten bleibt, dass der Werth E eine Durchschnittsgrösse ist; es hängt von der Bauart des Ankers ab, in welchen Grenzen der Werth während eines Umlaufes schwankt.

Wenn der Anker, wie in der Fig. 110, nur zwei äussere Leiter in Form einer einfachen Schleife besässe, so würde die elektromotorische Kraft von Null bis zu einem Maximum schwanken. Bezeichnet man den untersten Punkt bei senkrechter Stellung der umlaufenden Schleife mit 0 Grad, so ist die Lage zur Linken der punktirten Schleife 90 Grad, falls die Drehung im Sinne des Uhrzeigers erfolgt. Die oberste Lage ist mit 180 Grad und die äusserste Lage zur Rechten mit 270 Grad zu bezeichnen. Die inducirte elektromotorische Kraft wird in der Schleife beim Durchgang durch die Lagen 0 Grad und 180 Grad gleich Null sein, denn in diesen Lagen gleiten die Leiter eher in der Richtung der Kraftlinien, als dass sie solche schneiden; ein Maximum findet beim Durchgang durch 90 Grad und 270 Grad statt.

Wenn die Zahl der wirklich eingeschlossenen Kraftlinien ein Minimum ist, so wird die Menge der in der Zeiteinheit geschnittenen oder eingeschlossenen Linien ein Maximum und umgekehrt (vergl. S. 32).

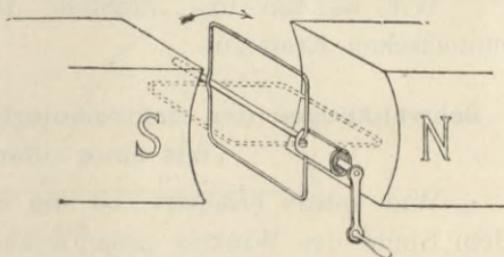


Fig. 110.

In einem gleichförmigen Felde ist in irgend einer Zwischenlage die wirkliche Zahl der eingeschlossenen Kraftlinien proportional dem Cosinus des Winkels, den die Wickelung von ihrer Null-Lage ab durchlaufen hat, die elektromotorische Kraft wird dem Sinus jenes Winkels proportional. Genau genommen müssten wir den Sinus mit negativem Werth nehmen, um die elektromotorische Kraft darzustellen, weil nach der gebräuchlichen Auffassung die inducirte elektromotorische Kraft der Geschwindigkeit der Abnahme der eingeschlossenen Linienzahl proportional ist. Wir brauchen die Vorzeichen indessen nicht zu beachten, weil bei geeigneter Lage des Stromwenders sämtliche inducirten elektromotorischen Kräfte in derselben Richtung im äusseren Stromkreise wirken. Nehmen wir die Winkelgeschwindigkeit zu $2\pi n$, so ist der in t Secunden durchlaufene Winkel gleich $2\pi nt$. Nennen wir diesen Winkel ω , und rechnen wir ihn wie zuvor von dem tiefsten Punkte an, so berechnet sich die elektromotorische Kraft in der Windung zu irgend

verändern, so würden wir die in der Fig. 112 punktirte gerade Linie erhalten, die unterhalb eine rechteckige Fläche gleich der Summe der von den wellenförmigen Curven gebildeten Flächen einschliesst.

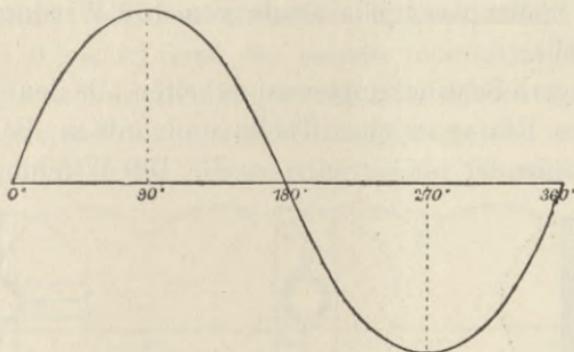


Fig. 111.

Die Fläche würde eine Höhe von der Grösse des Durchschnittes der Höhen sämtlicher Curvenpunkte besitzen. Da jede der wellen-

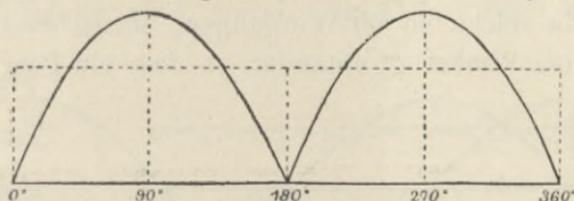


Fig. 112.

förmigen Curven einen Theil einer Sinuscurve bildet, so wird die Durchschnittshöhe $\frac{2}{\pi}$ oder $\frac{7}{11}$ der grössten Höhe betragen. Wegen der Selbstinduction in den Wicklungen schwankt der Strom in Wirklichkeit nicht wie die Spannung, die Einsenkung zwischen den Curven wird theilweise ausgefüllt¹⁾.

Schwankungen in einem Anker mit geschlossener Wicklung und mit Abtheilungen.

Wie auf Seite 39 und 58 erläutert worden ist, wickelt man aus baulichen Gründen Ankerwicklungen in zwei parallel verbundenen Sätzen. Bestände jede der beiden Wicklungen aus 100 Windungen, so würde die vereinigte Wirkung in betreff der Induction elektromotorischer Kraft nicht grösser sein, als wenn eine Wicklung allein thätig wäre, jedoch wird der innere Widerstand auf die Hälfte

1) Vergl. die Bemerkungen von C. F. Varley in Philos. Mag. 1867 und von Poley in dem Sitzungsber. d. Wiener Akad. IIa. Mai 1891.

vermindert. Wir nehmen nunmehr an, dass die Ankerwickelungen aus Paaren von Wickelungen bestehen. Anstatt einer Spule mit 200 Windungen, wie in der Fig. 113 dargestellt ist, zerlegen wir solche in ein Spulenpaar, jede Spule von 100 Windungen, wie die Fig. 114 darstellt.

Um geringere Schwankungen zu erhalten, theilen wir jede einzelne Spule des Paares in zwei Theile und ordnen die Paare rechtwinkelig zu einander an. Seien z. B. 100 Windungen in jeder

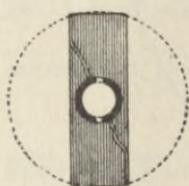


Fig. 113.

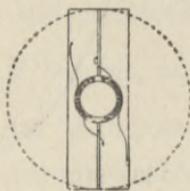


Fig. 114.

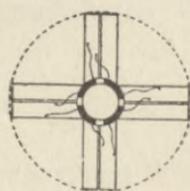


Fig. 115.

Wicklung ursprünglich vorhanden, so zerlegen wir jede der beiden Wickelungen in solche zu 50 Windungen, setzen diese aber kreuzweise im rechten Winkel zu einander, so dass ein Paar in die beste

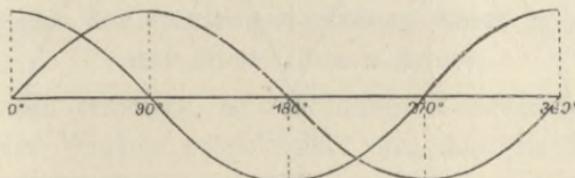


Fig. 116.

Lage des Feldes gelangt, wenn das andere sich aus dieser entfernt. Diese Anordnung giebt die Fig. 115 an. Wir werden nunmehr zwei sich überdeckende Curven erhalten; jede derselben ist jedoch nur

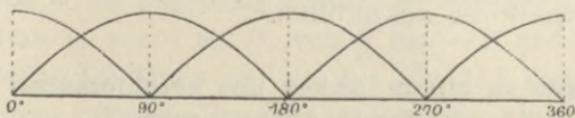


Fig. 117.

halb so hoch als vorher, weil die von der halben Windungszahl umwundene Fläche nur halb so gross als die frühere ist.

Wäre kein Stromwender vorhanden, so würde die elektromotorische Kraft in den beiden Wickelungen wie die Curven der Fig. 116 schwanken, welche um eine Viertel-Periode gegeneinander verschoben sind.

Wenn jedoch die Enden der beiden Abtheilungen der Wicklung mit einem passenden Stromwender oder Stromabgeber verbunden

werden, so werden die Inductionen mittels der schleifenden Bürsten gerichtet, und die beiden Curven erhalten die Gestalt der Fig. 117.

Wir wollen jetzt feststellen, welches Ergebniss durch die übereinandergreifenden elektromotorischen Kräfte erzielt wird. Es ist klar, dass von 0 bis 90 Grad die beiden inductiven Wirkungen einander unterstützen und dass sie bei 45 Grad gleich sind. Es ergibt sich also in diesem Punkte eine Verdoppelung; die in Fig. 118 dargestellte Curve bildet die Summe der beiden Einzelcurven.

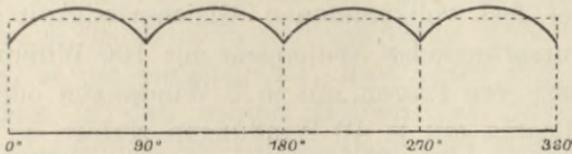


Fig. 118.

Diese Curve zeigt bereits einen Fortschritt in der Gleichmässigkeit, insofern als die Schwankungen weit geringer als die in der einzelnen Wickelung sind (vergl. Fig. 112). Die punktirte Linie,

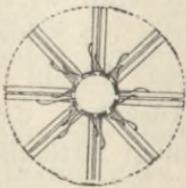


Fig. 119.

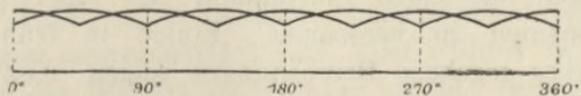


Fig. 120.

welche die Ebnung der Wellenberge anzeigt, hat genau die frühere Höhe. Der gesammte Betrag der Induction (die gesammte Zahl der geschnittenen Kraftlinien) bleibt also derselbe, ebenso die mittlere

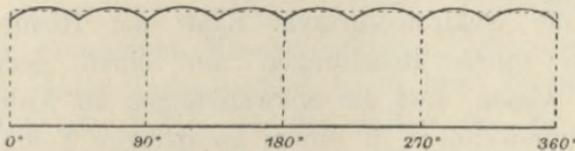


Fig. 121.

elektromotorische Kraft. Die gesammte elektrische Arbeit, die infolge Anordnung der Ankerwickelungen in zwei rechtwinkelig zueinander stehenden Sätzen sich ergibt, wird demnach zwar nicht vergrössert, wohl aber gewinnt der Strom an Zusammenhang und Gleichmässigkeit.

Zertheilen wir die Wickelungen weiter und gruppiren sie, wie die Fig. 119 zeigt, unter 45 Grad gegeneinander in vier Sätze von Wickelungspaaren, mit je 25 Windungen in jeder einzelnen Wickelung, verbinden sie entsprechend mit einem Stromwender, so werden wir eine Wirkung erhalten, die sich sehr leicht durch zwei Curven

darstellen lässt. Jede von diesen ist der vorhergehenden ähnlich, besitzt aber nur die halbe Höhe (Fig. 120).

Die grössten Höhen in der einen liegen 45 Grad weiter als die der anderen Curve; die sich ergebende resultirende Curve ist durch die Fig. 121 dargestellt und zeigt dieselbe mittlere Höhe, wie die frühere Curve, aber noch geringere Schwankungen. Es ist einleuchtend, dass mit dem weiteren Fortschreiten der Zerlegung in Abtheilungen und der symmetrischen Anordnung in gleichen Winkeln man sich einer fast vollkommenen Gleichmässigkeit nähern kann. Würde unser ursprüngliches Spulenpaar mit 100 Windungen in jeder Spule in 20 Sätze von Paaren mit je 5 Windungen oder auch nur in 10 Sätze von Paaren mit je 10 Windungen zerlegt, so wäre die Annäherung an die Gleichmässigkeit nahezu vollkommen.

Berechnung der Schwankungen der elektromotorischen Kraft in Ankern mit geschlossener Wickelung.

Wenn die Schwankungen der elektromotorischen Kraft wirklich genau dem Sinusgesetze folgten, wäre es nicht schwierig, die Schwankungen für einen Commutator mit einer beliebigen Anzahl von Segmenten zu berechnen. Einige in früheren Ausgaben dieses Werkes gegebene Berechnungen zeigen, dass bei einem 20 theiligen Commutator die Schwankungen der elektromotorischen Kraft weniger denn 1 vom Hundert und bei einem 36 theiligen Commutator weniger als $\frac{1}{5}$ vom Hundert betragen. Da wir aber die wirkliche Vertheilung des Feldes an den Stellen, wo die Wickelungen gewendet werden, nicht kennen und überhaupt nicht wissen, nach welchem Gesetz sich die elektromotorische Kraft am Rande des Feldes ändert, haben solche Rechnungen nur einen geringen Werth. Es genügt zu wissen, dass die Schwankungen bei Anwendung eines 20 theiligen Stromwenders in einem zweipoligen Felde praktisch zu vernachlässigen sind, so dass es eine überflüssige Vorsicht ist, einen Stromwender mit noch mehr Theilen zu verwenden, wenn es nicht aus anderen Gründen — z. B. zur Vermeidung der Funkenbildung oder der Inductionsstörungen in Fernsprechleitungen — geschieht.

Messung der Schwankung.

Der relative Schwankungsbetrag in der Stromstärke einer Maschine kann durch Beobachtung der inductiven Einwirkung auf einen benachbarten Kreis gemessen werden, in welchen ein Telephon eingeschaltet ist. Ist der Hauptstrom stetig, so vernimmt man keinen

Ton, schwankt aber der Hauptstrom, so inducirt jede Schwankung in dem Telephonkreise einen secundären Strom; den Grad und die Häufigkeit der Schwankungen kann man nach Maassgabe der Stärke und Höhe des Tones im Telephon schätzen. Die Stromschwankungen in einer Maschine von Brush wurden in dieser Weise bequem wahrgenommen.

Wirkung der ungleichzeitigen Stromwendung.

Wenn die Bürsten derartig stehen, dass der Contact an der einen Bürste nicht in demselben Augenblicke aufhört wie an der zweiten Bürste, so ist einleuchtend, dass leicht ungleiche elektromotorische Kräfte in den beiden Hälften des Ankerkreises entstehen. Diese augenblickliche Ungleichheit wird verschwinden, und eine zweite Ungleichheit (von entgegengesetztem Vorzeichen) wird folgen, sobald die Stromwendung an der zweiten Bürste erfolgt. Die Wirkung stellt sich ebenso, als ob ein schwacher Wechselstrom mit $2nc$ Wechselperioden in der Secunde im Ankerkreise wirkte. Derartige Wirkungen können in Ankern aus verschiedenen Ursachen eintreten: wenn die Zahl der Abtheilungen im Anker eine ungerade ist; wenn die Zahl der Leiter nicht in allen Abtheilungen dieselbe ist oder die Verbindungen unsymmetrisch sind; oder endlich, wenn die berührenden Ränder der Bürsten nicht genau an den entgegengesetzten Seiten eines Durchmessers liegen.

Messung der Menge der Kraftlinien \mathcal{E} .

Die Bestimmung der durch den Anker tretenden Menge magnetischer Linien bildet eine wichtige Aufgabe. Diese Menge wird am besten aus der gemessenen Maschinenleistung berechnet.

Die durch einen Umlaufzähler beobachtete Drehungsgeschwindigkeit, die Zahl der Leiter um den Anker und die gesammte in der Maschine erzeugte elektromotorische Kraft, die nach geeigneten elektrischen Methoden zu messen ist, ergeben aus der Grundgleichung als Werth für \mathcal{E} :

$$\mathcal{E} = \frac{10^8 E}{n \cdot N}.$$

Um E während des Ganges der Maschine zu messen, muss die Maschine entweder unter Einschaltung bekannter Widerstände laufen (um E aus dem Ohm'schen Gesetze zu bestimmen), oder E muss aus der Messung der Potentialdifferenz an den Bürsten mittels eines Spannungsmessers (vergl. S. 169) berechnet werden. Dann hat man

aus dem Widerstande und der Stromstärke im Anker den in Letzterem eintretenden Spannungsverlust zu bestimmen. Durch Hinzufügung des letzteren zu der gemessenen Spannung erhält man die gesammte elektromotorische Kraft.

Die Magnetomaschine und die besonders erregte Maschine.

Bei Magnetomaschinen, in denen das Feld den stählernen Dauermagneten entstammt, ist \mathfrak{S} sowohl von dem Magnetismus des Stahles, als auch von der Beschaffenheit des eisernen Ankerkernes abhängig. Die Zahl der den Anker durchsetzenden Kraftlinien wird indessen durch Gegenwirkung des Ankers, sobald der Maschine ein starker Strom entnommen wird, vermindert. Wenn der Magnetismus der Feldmagnete, verglichen mit dem, der von den Ankerwickelungen herrührt, so ausserordentlich gross wäre, dass die Gegenwirkung sehr klein ausfiele, so würde, da die Grundgleichung lautet

$$E = nN\mathfrak{S},$$

für irgend eine gegebene Magnetomaschine E der Umlaufszahl n direct proportional sein. Die Praxis zeigt uns aber, dass dies nicht der Fall ist. Die Zahl der Umläufe, um welche die wirkliche Umdrehungszahl grösser ist als sie zu sein brauchte, wenn genaue Proportionalität herrschte, nennen wir »todte Umläufe«. Nehmen wir eine Magnetomaschine mit 600 Umläufen in der Minute (also $n=10$) und erhalten wir von dieser 17 Volt elektromotorische Kraft, so müsste die Maschine ohne Gegenwirkungen des Ankers bei 1200 Umläufen 34 Volt liefern. Diese Leistung wird niemals ganz erreicht; bei manchen Maschinen wird aber fast die directe Proportionalität erzielt, so lange die Maschine keinen Strom zu liefern braucht. In dem Falle ist die einzige Gegenwirkung, welche das Abweichen von der Proportionalität bewirken kann, in Wirbelströmen zu suchen. Wenn die Umlaufszahl und die in dem Anker erzeugte Spannung beobachtet und in einem Diagramm aufgetragen werden, wird die Schlantheit der »Curve«, welche eine nach dem Coordinatenanfang geneigte Gerade sein sollte, zeigen, wie nahe die theoretische Leistung erreicht ist.

Wenn der Strom im Anker dadurch gleichbleibend gehalten wird, dass die äusseren Widerstände im passenden Verhältniss zur Geschwindigkeit vergrössert werden, so lässt sich die entmagnetisirende Wirkung des Ankers gleichbleibend erhalten, wenn auch die Maschine Strom abgibt.

Bei einigen Versuchen, die Joubert¹⁾ anstellte, wurde die elektromotorische Kraft bei verschiedenen Geschwindigkeiten mittels eines Elektrometers gemessen, welches keinen Strom durchliess. Joubert fand das theoretische Gesetz fast genau erfüllt.

Nach den Versuchen war: die Geschwindigkeit 500, 720, 1070 Umläufe in der Minute, die elektromotorische Kraft 103, 145, 208 Volt.

Spannung an den Klemmen einer Dynamomaschine. Spannungsverlust.

Die Klemmenspannung einer Magnetomaschine wie jeder Dynamomaschine ist, sobald die Maschine Arbeit leistet, geringer als die gesammte inducirte elektromotorische Kraft E , weil ein Theil von E zur Ueberwindung des Ankerwiderstandes verbraucht wird. Bedeutet e die Potentialdifferenz zwischen den Klemmen — die Klemmenspannung —, so ist nur während des Umlaufes bei offenem äusseren Stromkreise, wenn also kein Strom entstehen kann, $e = E$. Es ist vortheilhaft, E durch andere Grössen auszudrücken, denn sobald die Maschine Strom liefert, kann man E nicht mehr mittels eines Spannungsmessers oder eines Elektrometers unmittelbar bestimmen, während e stets unmittelbar gemessen werden kann.

Bedeutet r_a den inneren Widerstand der Maschine, d. h. den Widerstand der Ankerwicklung oder den zwischen den Klemmen überhaupt bestehenden Widerstand, und ist R der Widerstand des äusseren Stromkreises, i die Stromstärke, so hat man nach dem Ohm'schen Gesetze die Beziehung

$$E = i(r_a + R).$$

Es ist aber auch

$$e = iR,$$

woraus

$$\frac{e}{E} = \frac{R}{r_a + R} \dots \dots \dots \text{(III)}$$

und

$$e = \frac{R}{r_a + R} E.$$

Man bemerke sich auch den Werth

$$E = \frac{r_a + R}{R} e,$$

denn nach dieser Formel lässt sich der Werth von E durch Messungen von e mittels eines Spannungsmessers ableiten.

1) Vergl. auch Mordey's Versuche. Journ. Electr. Engin., Bd. 19, S. 233. 1890.

Häufig ist der Werth R unbekannt; subtrahirt man die beiden Gleichungen

$$E = i(r_a + R)$$

und $e = iR,$

so folgt $E - e = ir_a$

oder* $e = E - ir_a \dots \dots \dots (IV)$

Demnach ist die Klemmenspannung gleich der gesammten Spannung im Anker vermindert um die zur Ueberwindung des Ankerwiderstandes nothwendige Spannung.

Die Spannung ir_a , die im äusseren Kreise nicht nutzbar wird, nennt man den Spannungsverlust; je geringer der innere Widerstand ist, desto geringer wird auch der Spannungsverlust sein. Bestimmt man e mittels eines Spannungsmessers, so findet man E , indem man zu e den Spannungsverlust addirt. Der letztere wird berechnet, indem man mittels eines Strommessers den Ankerstrom bestimmt und diesen Werth mit dem bekannten inneren Widerstand multiplicirt. Bei guten neueren Maschinen beträgt der Spannungsverlust bei voller Belastung nicht mehr als 2 bis 3 vom Hundert der ganzen Spannung.

Beziehung zwischen der gesammten elektromotorischen Kraft und der Klemmenspannung.

Der vorhin erläuterte wesentliche Unterschied zwischen der gesammten elektromotorischen Kraft und demjenigen Theile, der als Klemmenspannung e nutzbar wird, lässt sich durch die folgende geometrische Darstellung, die von Ernst Richter¹⁾ herrührt, darstellen.

In einer Maschine mit gleichbleibendem e , wie solche später noch besonders betrachtet werden, wird E nicht gleichbleibend sein, abgesehen von dem unerreichbaren Zustande eines widerstandslosen Ankers. Ist r der innere Widerstand, bestehend aus dem Ankerwiderstand und dem Widerstand der Magnetwickelungen, die sich im Hauptkreise befinden ($r = r_a + r_m$), so ist

$$E = e + ir.$$

Ist E gleichbleibend, so kann e bei veränderlichem i nicht gleichbleibend sein; umgekehrt, wenn e gleichbleibend ist, kann E dies nicht sein. Wir haben sonach zwei Fälle zu betrachten:

1. E ist gleichbleibend. Die Widerstände werden als Abscissen, die elektromotorischen Kräfte als Ordinaten aufgetragen, Fig. 122,

$$OA = r, AN = R, OB = E.$$

1) Elektrot. Zeitschr., Bd. 4, S. 161. 1883.

Die Linie BN kennzeichnet den Spannungsverlauf im ganzen Stromkreise. Von der elektromotorischen Kraft $OB = E$ wird ein Theil CM zur Ueberwindung des Widerstandes r verbraucht, so dass für den äusseren Widerstand $AN = R$ die Klemmenspannung AM verbleibt, wenn der gesammte Widerstand des Kreises $= ON$ ist. Man errichte im Punkte N nun eine Senkrechte $NQ = e$; nehme

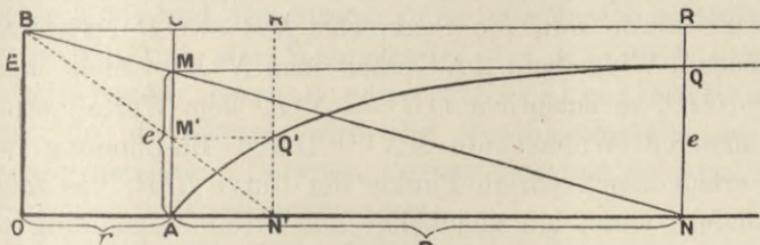


Fig. 122.

dann einen geringeren äusseren Widerstand $R^1 = AN^1$ an, so findet man durch ein ähnliches Verfahren den Werth von $e = AM^1$ oder N^1Q^1 . Es lassen sich in dieser Weise beliebig viele Punkte Q^1 be-

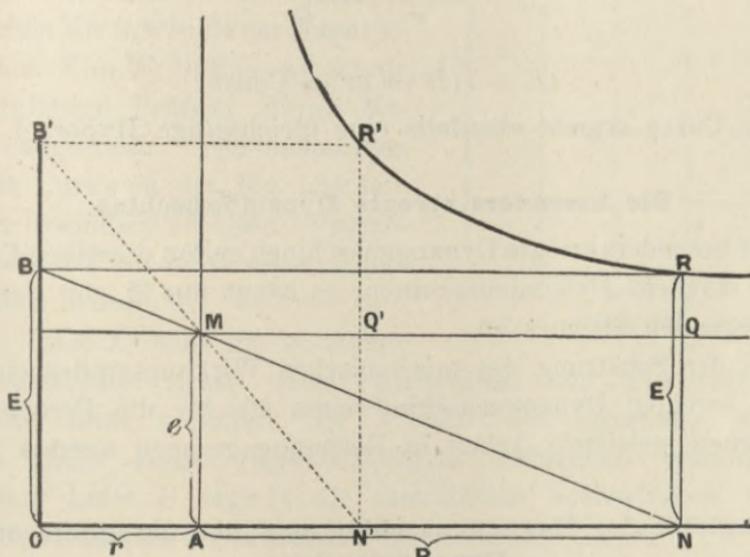


Fig. 123.

stimmen, welche die Curve AQ^1Q ergeben. Die Letztere zeigt den Verlauf der Klemmenspannung bei wachsendem äusseren Widerstande, während die elektromotorische Kraft gleichbleibend ist und in ihrem Verlaufe daher durch die Linie BR bezeichnet wird.

Die Gleichung dieser Curve wird durch die Bedingung gegeben:

$$\frac{E - e}{E} = \frac{r}{R + r},$$

wo

$$(E - e)(R + r) = Er = \text{Const.}$$

Die Gleichung ist die einer gleichseitigen Hyperbel mit OB und BR als Asymptoten.

2. e ist gleichbleibend. Wie im ersteren Falle ist $OA = r$: $AN = R$ und $AM = e$ (Fig. 123).

Man ziehe NM und verlängere diese Linie bis B . Dann giebt OB den Werth von E an, der für $R = AN$ die Klemmenspannung e liefert. Es werde nun die Senkrechte $NR = OB$ errichtet. Für einen anderen Widerstand AN^1 erhält man N^1B^1 . Zieht man dann $N^1R^1 = OB^1$, so entspricht $OB^1 = N^1R^1$ dem Werthe von E bei einem äusseren Widerstande AN^1 . Durch Bestimmung weiterer Werthe erhält man mehrere Punkte der Curve R^1R , die zeigt, wie sich E ändern muss, um gleichbleibende Klemmenspannung bei veränderlichem äusseren Widerstande zu erhalten. Der Verlauf des gleichbleibenden Werthes e wird durch die Linie MQ dargestellt.

Die Gleichung der Curve entspricht der Bedingung

$$\frac{E - e}{r} = \frac{e}{R}$$

oder

$$(E - e)R = er = \text{Const.}$$

Die Curve ergibt ebenfalls eine gleichseitige Hyperbel.

Die besonders erregte Dynamomaschine.

Für besonders erregte Dynamomaschinen gelten dieselben Formeln, wie für Magneto-Dynamomaschinen, es hängt nur \mathfrak{C} von der Stärke des erregenden Stromes ab.

Bei der Schätzung des mechanischen Wirkungsgrades einer besonders erregten Dynamomaschine muss die für die Erregung der Feldmagnete geleistete Arbeit in Rechnung gezogen werden.

Charakteristik der Magnetomaschine und der besonders erregten Dynamomaschine.

Der Magnetismus der Stahlmagnete einer Magneto-Dynamomaschine ist nahezu gleichbleibend; dasselbe ist bei besonders erregten Dynamomaschinen der Fall, wenn der Erregerstrom constant gehalten wird. Dies hat zu der Annahme geführt, als ob in solchen Maschinen die elektromotorische Kraft von der Geschwindigkeit allein abhinge. Letzteres trifft indessen nicht zu. Wegen der Neigung des Ankerstromes, eine quermagnetisirende und entmagnetisirende Wirkung auszuüben, vermindert sich die Anzahl der wirklich den

Ankerkern durchsetzenden magnetischen Linien, sobald der Strom im Anker stark anwächst; je stärker der Strom wird, desto stärker ist die Gegenwirkung. Wie auf Seite 82 dargelegt ist, wird die entmagnetisirende Wirkung des Ankerstromes um so grösser, je grösser die Verschiebung der Bürsten ist. Wie später erörtert wird (Seite 183), ist es zweckmässig, die Beziehung zwischen elektromotorischer Kraft und dem Strome unter verschiedenen Bedingungen der Geschwindigkeit, des Widerstandes u. s. w., durch sogenannte charakteristische Curven oder »Charakteristiken« darzustellen. In der Regel wird die Geschwindigkeit als gleichbleibend angenommen. Derartige Curven erweisen sich zum Studium der verschiedenen Wechselwirkungen zwischen Feldmagnet und Anker besonders nutzbringend.

Die Charakteristiken der besonders erregten Dynamomaschinen zeigen den gleichen Abfall der elektromotorischen Kraft, wie die der Magnetomaschinen. Von W. B. Esson¹⁾ wurde eine sorgfältige Prüfung dieser Maschinen angestellt. Von demselben rührt die Curve in der Fig. 124 her, die einer besonders erregten Dynamomaschine mit Pacinotti'schem Ringe entnommen wurde.

Die Linie *E* stellt die gesammte elektromotorische Kraft unter Ausschluss der Gegenwirkungen dar. Die Linie *e* liefert die Werthe der Spannung an den Bürsten, falls keine Gegenwirkungen vorhanden wären. Die gekrümmte Linie *B* ergibt die thatsächlich beobachteten Werthe, wenn die Maschine verschiedene Stromstärken liefert. Der starke Abfall am unteren Ende rührt wahrscheinlich von der grösseren entmagnetisirenden Wirkung des Ankerstromes her, die sich auch (wie bei starken Strömen der Fall ist) durch eine beträchtliche Verstellung der Bürsten bemerkbar macht. Wenn die Feldmagnete schwach erregt werden, so zeigt die Charakteristik stets eine solche stärker abwärts gerichtete Krümmung.

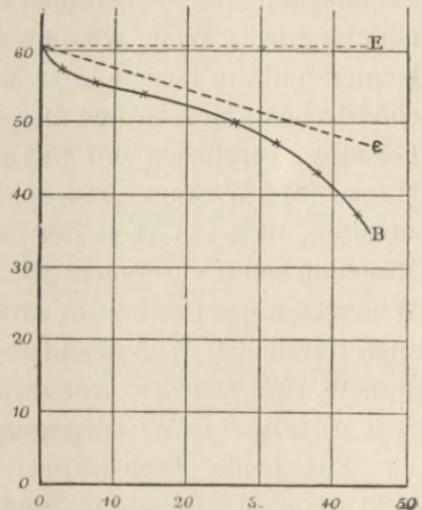


Fig. 124.

1) Electr. Review, Bd. 14, S. 303. April 1894. Vergl. auch die Abhandlungen von Deprez, Comptes Rendus, Bd. 94, S. 15 und 89. 1882.

Wirkungsgrad und ökonomischer Coëfficient der Dynamomaschinen.

Es sei die zum Betriebe einer Dynamomaschine aufgewendete mechanische Arbeit bekannt. Man kann solche entweder unmittelbar mittels eines »Transmissions-Dynamometers« messen, oder durch Aufnahme eines Indicatorgrammes an der treibenden Dampfmaschine, oder in gewissen besonderen Fällen, wenn die Feldmagnete auf Drehzapfen gebracht oder durch ein Gegengewicht gehalten werden können, eine ursprünglich von Rev. F. J. Smith ausgeführte und später von Deprez und Brackett beschriebene Methode anwenden, nach der die mechanische Wirkung zwischen dem Anker und dem Feldmagnete zur Bestimmung der zum Betriebe verwendeten Leistung benutzt wird. Wenn wir nun die aufgewendete mechanische Leistung kennen und die Leistung der Maschine, d. h. den Betrag an geleisteten elektrischen Pferdekraften messen, so giebt die verbrauchte mechanische Leistung, verglichen mit der entwickelten elektrischen Leistung, ein Maass des »Wirkungsgrades« der Maschine. Es ist jedoch wohl festzuhalten, dass ein Theil der entwickelten elektrischen Energie in der Maschine selbst verbraucht wird, und zwar durch den unvermeidlichen Widerstand des Drahtes im Anker, und bei selbsterregenden Maschinen auch durch den Widerstand der Feldmagnetwickelungen. Man muss deshalb zwischen dem gesammten Wirkungsgrad der Maschine und dem nutzbaren Wirkungsgrad unterscheiden (vergl. S. 101).

Für beide Verhältnisse müssen Mittel zur Bestimmung der elektrischen Leistung der Maschine oder jedes Theiles ihres Stromkreises zu Gebote stehen.

Die Leistung eines Stromes lässt sich ausdrücken, wenn zwei Grössen bekannt sind: die Stromstärke und die Spannung zwischen den Endpunkten desjenigen Leiters, in dem die zu bestimmende Energie aufgewendet wird. Die Stromstärke in Ampere kann mittels eines guten Strommessers bestimmt werden, die Spannung in Volt mittels eines guten Spannungsmessers. Das Product Volt mal Ampere ergiebt die in jeder Secunde verausgabte elektrische Energie in Einheiten der Leistung, d. h. in Watt. Da eine Pferdekraft gleich 736 Watt ist, so hat man die Zahl der Volt-Ampere (der Watt) durch 736 zu dividiren, um das Ergebniss in Pferdekraften zu erhalten. Ist i die Stromstärke in Ampere und e die Spannung (Potentialdifferenz) in Volt, so ist die Leistung

$$p = \frac{ei}{736} \dots \dots \dots (V).$$

Das Verhältniss der nutzbaren elektrischen Energie im äusseren Stromkreise zur entwickelten gesammten elektrischen Energie wird als elektrisches Güteverhältniss der Maschine oder als »ökonomischer Coëfficient« bezeichnet¹⁾. Derselbe wird algebraisch in folgender Weise ausgedrückt:

Liefert der Anker einen Strom von i_a Ampere und beträgt die gesammte elektromotorische Kraft E Volt, so ist die gesammte elektrische Leistung

$$= E i_a \text{ Watt.}$$

Beträgt die Klemmenspannung der Maschine e Volt, so ist die Nutzleistung

$$= e i \text{ Watt.}$$

Nennen wir den ökonomischen Coëfficienten — das elektrische Güteverhältniss — η , so ist

$$\eta = \frac{\text{Nutzleistung}}{\text{Gesamtleistung}} = \frac{e i}{E i_a},$$

oder wenn die Maschine keine Nebenschlusswicklung besitzt, so dass $i = i_a$ ist,

$$\eta = \frac{e}{E}.$$

Das Verhältniss $\frac{e}{E}$ hängt nun aber von der Beziehung zwischen innerem und äusserem Widerstand ab, denn

$$\frac{e}{E} = \frac{R}{r + R} \text{ (vergl. die Gleichung III),}$$

wo R den Widerstand des äusseren Kreises, r den inneren Widerstand (im Anker, im Feldmagnet u. s. w.) bedeutet. Für eine Reihemaschine oder Magnetomaschine erhalten wir daher

$$\eta = \frac{R}{r + R} \quad \dots \quad \text{(VI).}$$

Je mehr man r vermindern kann, desto mehr nähert sich η der Einheit. Könnte man eine Maschine ohne inneren Widerstand herstellen, so würde von der Stromenergie zur Ueberwindung des Ankerwiderstandes bezw. zur Erhitzung der Wickelung auch nichts verbraucht werden.

1) In Deutschland ist die Bezeichnung »elektrisches Güteverhältniss« gebräuchlich. Dieser Ausdruck wird bei dieser Uebersetzung meistens angewendet. Daneben wurde aber auch Thompson's Bezeichnung »ökonomischer Coëfficient« beibehalten.

Wir werden später erläutern, in welcher Weise sich der Werth für η bei Nebenschluss- und Verbundmaschinen ändert.

Zum Betriebe der Maschine mögen P mechanische Pferdekkräfte verwendet werden. Da die gesammte Leistung der Maschine $= \frac{Ei_a}{736}$ ist, so stellt sich der gesammte mechanische Wirkungsgrad bzw. der Wirkungsgrad der elektrischen Umsetzung auf

$$\frac{Ei_a}{736 P}$$

und der nutzbare mechanische Wirkungsgrad auf

$$\frac{ei}{736 P}$$

Da der erste Ausdruck E und der zweite e enthält, so lässt sich aus dem gesammten Wirkungsgrade der nutzbare durch Multiplication mit dem Werth für $\eta \left(\frac{ei}{Ei_a} \right)$ ableiten. Durch Division des nutzbaren Wirkungsgrades durch den gesammten Wirkungsgrad kann man auch η (das Güteverhältniss) berechnen.

Aenderung des elektrischen Güteverhältnisses mit der Stromstärke.

Ehe wir diesen Gegenstand verlassen, ist noch zu bemerken, dass der Wirkungsgrad sich mit der Belastung ändert, da die Stromstärke i in jedem Ausdrucke für den Wirkungsgrad auftritt, und da i nicht allein vom Widerstande der Maschine selbst, sondern auch von dem der Lampen oder anderen Theilen des Nutzstromkreises abhängt. In der Regel ist der Wirkungsgrad grösser bei geringer, als bei voller Belastung, was dem Umstande beizumessen ist, dass der Verlust durch Erwärmung der Leiter mit dem Quadrate der Stromstärke anwächst. Bei den Dampfmaschinen ist das Gegentheil der Fall, der Wirkungsgrad ist am grössten bei voller Belastung.

Die Reihenmaschine.

Die Reihenmaschine (vergl. Fig. 41 und 125) besitzt nur einen Stromkreis; die Stromstärke hängt von der elektromotorischen Kraft E und der Summe der Widerstände im Stromkreise ab. Die letzteren bestehen aus:

R = dem äusseren (veränderlichen) Widerstande.

r_a = dem Widerstande des Ankers.

r_m = dem Widerstande der Magnetwicklung.

Nach dem Gesetz von Ohm ist:

$$E = i(R + r_a + r_m).$$

Die Klemmenspannung ist $e = Ri$.

Es erscheint zweckmässig, auch einen Ausdruck für die Spannung an den Bürsten zu erhalten, denn diese ist grösser als e , mit Rücksicht auf den Widerstand der Magnetwicklung, aber kleiner als E , mit Rücksicht auf den Widerstand der Ankerwicklung. Die Bürstenspannung sei ε . Dann hat man nach Ohm's Gesetz

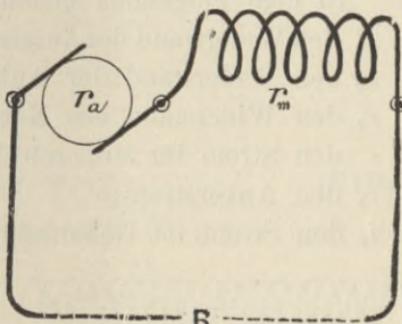


Fig. 125.

$$\varepsilon = i(R + r_m)$$

und

$$e = E - i(r_a + r_m).$$

Oekonomischer Coëfficient (Güteverhältniss) einer Reihemaschine.

Aus dem Gesetze von Joule folgt als Werth für η

$$\eta = \frac{\text{nützliche Arbeit}}{\text{gesamnte Arbeit}} = \frac{i^2 R t}{i^2 (R + r_a + r_m) t} = \frac{e}{E}$$

oder

$$\eta = \frac{R}{R + r_a + r_m} \dots \dots \dots \text{(VII).}$$

Dieser Ausdruck wird ein Maximum, wenn sowohl r_a als auch r_m sehr klein sind.

Beispiel. In einer von Esson entworfenen „Phönix“-Bogenlichtmaschine war $r_a = 3,448$ Ohm, $r_m = 4,541$ Ohm. Wenn $i = 10$ A war, so betrug der Spannungsverlust 79,89 Volt.

Um die Entwicklung weiter zu führen, würde es der Benutzung des Zusammenhanges von E mit der Zahl der Ampere-Windungen der Erregerwicklungen bedürfen, wozu das Gesetz der Magnetisirung erforderlich ist. Wenn wir die auf Seite 134 gegebene Annäherungsformel von Frölich benutzten, würden wir auch für den Zusammenhang zwischen E und der Zahl der Ampere-Windungen eine Annäherungsformel erhalten. Wir nehmen jedoch hiervon Abstand und verweisen nur auf die 3. Ausgabe dieses Werkes, wo diese Entwicklungen und ähnliche von Frölich, Clausius und Rücker gegeben wurden.

Die Nebenschlussmaschine.

Bei der Nebenschlussmaschine kommen zwei Stromkreise in Betracht: der Hauptkreis und der Nebenschlusskreis.

In dem Folgenden bedeutet:

R den Widerstand des äusseren Kreises (Zuleitungen, Lampen u. s. w.);

r_a den Widerstand der Ankerwicklung;

r_s den Widerstand des Nebenschlusskreises (Magnetwicklung);

i den Strom im äusseren Hauptkreise;

i_a den Ankerstrom;

i_s den Strom im Nebenschlusskreise.

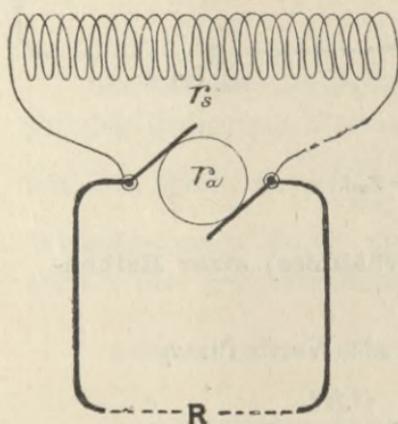


Fig. 126.

Es ist nun

$$i_a = i + i_s,$$

weil der im Anker erzeugte Strom sich in dem Haupt- und Nebenschlusskreise verzweigt und gleich der Summe der Zweigströme sein muss.

Den Theil des Stromes, der durch den Nebenschluss geht und im äusseren Kreise nicht nutzbar wird, können wir als »Stromverlust« bezeichnen; in einer guten neuen Maschine beträgt der Verlust nur 2 bis 3 Proc. des gesammten Stromes.

Ist e die Klemmenspannung, so lässt sich der Stromverlust aus der Gleichung

$$i_s = \frac{e}{r_s}$$

berechnen.

Beispiel. In einer Maschine von Kapp (Fig. 259), die 200 A bei 105 Volt Klemmenspannung lieferte, war $r_s = 31$ Ohm, der Stromverlust also 3,4 A; der gesammte Strom im Anker bei voller Belastung betrug also 203,4 A.

Nach Ohm's Gesetz muss $e = Ri$

und $e = r_s i_s$

sein, weil die Endpunkte des Hauptkreises auch die des Nebenschlusses bilden.

Der reducirte Widerstand des verzweigten Kreises ist ferner

$$\frac{Rr_s}{R + r_s},$$

woraus folgt, dass $E = \left(r_a + \frac{Rr_s}{R + r_s} \right) i_a$.

Gleichzeitig können wir einen Ausdruck für denjenigen Theil der elektromotorischen Kraft finden, der zur Ueberwindung des Ankerwiderstandes verbraucht wird. Dieser Theil ist die Differenz zwischen der gesammten elektromotorischen Kraft E und der Klemmenspannung e .

Nach Ohm's Gesetz ist

$$E - e = r_a i_a$$

oder

$$E - e = r_a (i + i_s).$$

Daraus

$$e = E - r_a (i + i_s) \quad . \quad . \quad . \quad (VIII).$$

Wir finden ebenso einen Ausdruck für E aus e und den Widerständen.

Vorhin hatten wir

$$E = \left(r_a + \frac{R r_s}{R + r_s} \right) i_a.$$

Setzen wir für i_a den Werth $i + i_s$ und für diese Einzelwerthe

$\frac{e}{R}$ bzw. $\frac{e}{r_s}$, so folgt:

$$E = e \left[\frac{R r_s + R r_a + r_a r_s}{R + r_s} \left(\frac{R + r_s}{R r_s} \right) \right]$$

oder

$$E = e r_a \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{r_a} + \frac{1}{r_s} \right) \quad . \quad . \quad . \quad (VIII a).$$

Der in der Klammer stehende Werth bedeutet die Summe der Leitungsfähigkeiten der drei Stromwege und ist demzufolge gleich der Leitungsfähigkeit der nebeneinander geschalteten Wege, wie sie von Bürste zu Bürste gemessen werden kann. Setzen wir die Bezeichnung \mathbf{R} für den Widerstand des gesammten Stromkreises der Maschine und des äusseren Kreises, wie man diesen Widerstand von Bürste zu Bürste bestimmen kann, so wird also

$$E = e \cdot \frac{r_a}{\mathbf{R}}.$$

Oekonomischer Coëfficient (Güteverhältniss) der Nebenschlussmaschine.

Der ökonomische Coëfficient η ist das Verhältniss der elektrischen Nutzleistung im äusseren Kreise zur gesammten elektrischen Leistung.

Nach Joule's Gesetz wird im äusseren Kreise in t Secunden eine Nutzarbeit $= i^2 R t$ entwickelt, in derselben Zeit geht im Nebenschluss
 und im Anker
 Arbeit durch Erwärmung verloren.

$$i_s^2 r_s t$$

$$i_a^2 r_a t$$

Daraus

$$\begin{aligned}
 \eta &= \frac{\text{Nutzleistung}}{\text{Gesamtleistung}} = \frac{i^2 R}{i^2 R + i_s^2 r_s + i_a^2 r_a} \\
 &= \frac{1}{1 + \frac{R}{r_s} + \frac{i^2 r_a + 2 i i_s r_a + i_s^2 r_a}{i^2 R}} \\
 &= \frac{1}{1 + \frac{R}{r_s} + \frac{r_a}{R} + 2 \frac{i_s r_a}{i R} + \frac{r_a}{R} \left(\frac{i_s}{i}\right)^2} \\
 &= \frac{1}{1 + \frac{R}{r_s} + \frac{r_a}{R} + 2 \frac{R}{r_s} \cdot \frac{r_a}{R} + \frac{r_a}{R} \left(\frac{R}{r_s}\right)^2} \\
 &= \frac{1}{1 + \frac{R}{r_s} + \frac{r_a}{R} + 2 \frac{r_a}{r_s} + R \frac{r_a}{r_s^2}} \\
 &= \frac{1}{1 + \frac{R}{r_s} \left(1 + \frac{r_a}{r_s}\right) + \frac{r_a}{R} + 2 \frac{r_a}{r_s}}.
 \end{aligned}$$

Bezeichnet man der Kürze halber den gesammten inneren Widerstand $r_a + r_s$ mit r , so ist

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{R}{r_s} \cdot \frac{r}{r_s} + \frac{r_a}{R} + 2 \frac{r_a}{r_s}}.$$

Soll dieser Werth ein Maximum sein, so muss

$$\frac{d\left(1 + \frac{R}{r_s} \cdot \frac{r}{r_s} + \frac{r_a}{R} + 2 \frac{r_a}{r_s}\right)}{dR} = 0 \text{ sein,}$$

oder

$$\frac{r}{r_s^2} - \frac{r_a}{R^2} = 0,$$

woraus

$$R^2 = \frac{r_a r_s^2}{r} = r_a r_s \frac{r_s}{r}.$$

$$R = \sqrt{r_a r_s} \sqrt{\frac{r_s}{r}} \dots \dots \dots \text{(IX),}$$

$$R = r_s \sqrt{\frac{r_a}{r}} \dots \dots \dots \text{(IX a).}$$

Diese Gleichung liefert die Angabe, welcher Widerstand im äusseren Stromkreise bei gegebenen inneren Widerständen am

günstigsten ist. Setzt man den Werth für R in die Glieder jener Gleichung für η , die R enthält, ein, so wird

$$\frac{Rr}{r_s^2} = \frac{r}{r_s} \sqrt{\frac{r_a}{r}} = \frac{\sqrt{r_a r}}{r_s}$$

$$\frac{r_a}{R} = \frac{r_a}{r_s} \sqrt{\frac{r}{r_a}} = \frac{\sqrt{r_a r}}{r_s}$$

und daraus

$$\eta = \frac{1}{1 + 2 \frac{\sqrt{r_a r}}{r_s} + 2 \frac{r_a}{r_s}}$$

Da der Widerstand des Nebenschlusses im Vergleich zu dem des Ankers sehr gross ist, vielleicht 300 bis 1000 mal so gross, so lässt sich eine weitere Vereinfachung herbeiführen. Ist nämlich $\frac{r_a}{r_s}$ so klein im Vergleich zu den anderen Gliedern, dass es vernachlässigt werden kann, so erhält man

$$\eta = \frac{1}{1 + 2 \frac{\sqrt{r_a r}}{r_s}} \dots \dots \dots \text{(X)}$$

Da nun r_a im Vergleich zu r_s klein ist, so wird r nahezu gleich r_s , und man erhält als Näherungsgleichung:

$$\eta = \frac{1}{1 + 2 \frac{\sqrt{r_a r_s}}{r_s}}$$

oder

$$\eta = \frac{1}{1 + 2 \sqrt{\frac{r_a}{r_s}}} \dots \dots \dots \text{(XI)}$$

Der letzte Näherungswerth ist derselbe, den Lord Kelvin in dem Report of the British Association für 1881 gegeben hat, die Gleichung Nr. X ist indessen genauer. Aus XI ergibt sich, dass der Widerstand des Nebenschlusses wenigstens 324 mal so gross sein muss als der innere Widerstand der Ankerwicklung, wenn das Güteverhältniss nicht unter 90 vom Hundert sinken soll.

Wenn der Ankerwiderstand im Vergleich zum Widerstande des Nebenschlusses gering ist, so dass $r_s = r$ gesetzt werden darf (was sehr erwünscht wäre, falls es für die Praxis erreicht werden könnte), so folgt aus Gleichung IX, dass der Werth

$$R = \sqrt{r_a r_s} \dots \dots \dots \text{(XII)}$$

wird; d. h. wenn das Verhältniss zwischen r_a und r_s so günstig als möglich gewählt wird, so arbeitet man ökonomisch am besten mit einem äusseren Widerstande, der die mittlere Proportionale zwischen dem Widerstande des Ankers und des Nebenschlusses bildet; jede Abweichung hiervon drückt das Güteverhältniss herab.

Die folgende Regel würde praktisch zweckmässig sein: Man bestimme die Anzahl der Lampen bei gewöhnlicher voller Belastung und berechne den Widerstand, wenn die Lampen mit den Hauptleitungen verbunden sind. Man mache den Widerstand des Ankers gleich $\frac{1}{20}$ des erstgenannten Widerstandes, den Nebenschlusswiderstand aber 20 mal so gross. In diesem Falle wird etwa 4 Procent im Anker verbraucht und 4 Procent im Nebenschluss, so dass etwas mehr als 90 Procent für das Güteverhältniss verbleibt.

Eine von Sir C. W. Siemens im Jahre 1880 in den Philosophical Transactions beschriebene Nebenschlussmaschine ergab folgende Werthe:

	Anker	Nebenschluss	r_s / r_a	η in Proc. beobachtet
Siemens	0,204	11,26	48,4	69,3

Eine Edison-Maschine (Muster »K« für 250 Lampen) ergab bei der Prüfung in München:

	Anker	Nebenschluss	r_s / r_a	η in Proc. beobachtet
Edison „K“	0,0361	13,82	382,8	88,6

Eine Maschine von Edison-Hopkinson ergab:

	Anker	Nebenschluss	r_s / r_a	η in Proc. beobachtet
Widerstand (ohne Erwärmung)	0,009947	16,93	1702	93,66

Die vorhin als Beispiel gewählte Maschine von Kapp ergab einschliesslich der Reihenwicklung:

	Anker	Nebenschluss	r_s / r_a	} 92
Kalt	0,0306	29,133	952	
Warm	0,0329	31,08	945	

Kapitel X.

Charakteristische Curven.

Manche praktische Aufgaben, in betreff der Herstellung von Maschinen, haben durch Anwendung graphischer Darstellungen und besonders durch Benutzung der sogen. charakteristischen Curven ihre Lösung gefunden. Die Art des Entwerfens und die Anwendung der letzteren bildet einen wichtigen Abschnitt in der Theorie der Dynamomaschine. Für viele praktische Zwecke erweist sich keine andere Methode so nützlich.

Die charakteristische Curve steht zur Dynamomaschine in demselben Verhältniss, wie das Indicatordiagramm zur Dampfmaschine. Wie man durch Einsicht in das Diagramm der Dampfmaschine eine Vorstellung von den Eigenschaften der Maschine erlangen kann, so vermag man durch Betrachtung der Charakteristik einer Dynamomaschine ein Urtheil über die Eigenschaften und Leistung derselben zu gewinnen. Die Vergleichung lässt sich aber noch weiter ausdehnen.

Das Indicatordiagramm der Dampfmaschine dient zwei Zwecken, die, wenn auch nicht ohne Zusammenhang, doch verschieden sind. Ist der Maassstab des Diagramms bekannt, so zeigt es uns unmittelbar die Leistung an, welche die Maschine entwickelt, und die von der gesammten durch die Curve (ohne Rücksicht auf deren Form) eingeschlossenen Fläche abhängt.

Aber wenn auch der Maassstab nicht bekannt ist, so geben die Einzelheiten in der Form der Curve in deren verschiedenen Punkten eine sehr bestimmte Belehrung über die Arbeit der Maschine, über die Vollkommenheit der Dampfausströmung, das Spiel der Ventile, die Wirksamkeit der Absperrung, die Angemessenheit der Zuführungsrohre und der Dampfwege durch die Ventile.

Aehnlich verhält es sich mit der charakteristischen Curve einer Dynamomaschine. Ist der Maassstab bekannt, so zeigt die Curve die

Zahl der Pferdekkräfte, die der Maschinenleistung entspricht; die Curve vermag sogar anzugeben, bei welcher Kraft die Maschine mit grösstem Nutzen betrieben werden kann. Wenn aber auch der Maassstab unbekannt ist, so liefern die Einzelheiten der Curvenform bestimmte Belehrung über die Bedingungen der Arbeit, den Sättigungsgrad der Magnete, über die Angemessenheit der Feldmagnete im Verhältniss zum Anker und über die Güte der Bauart in verschiedentlicher Hinsicht.

Die ersten in Betrieb genommenen selbsterregenden Dynamomaschinen waren Reihenmaschinen; sie besaßen eine merkwürdige

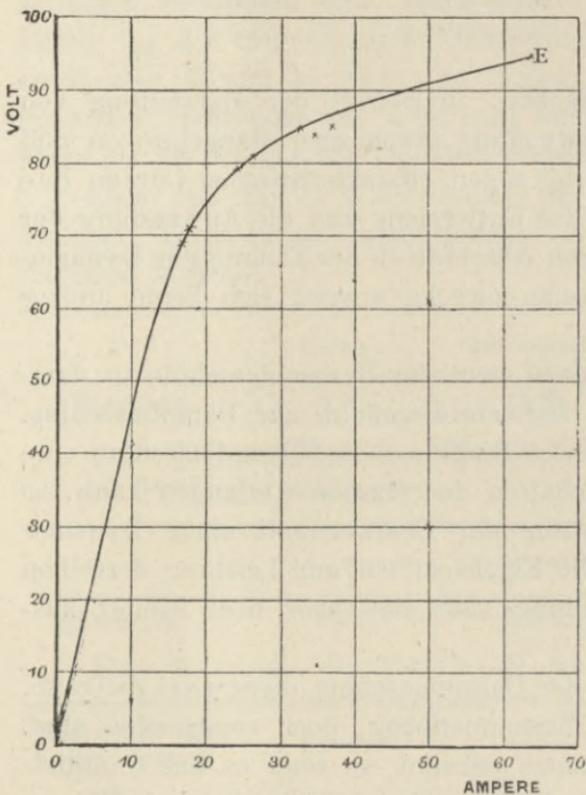


Fig. 127. Charakteristische Curve einer Reihenmaschine (720 Umläufe).

Die Bezeichnung »Charakteristik« wurde 1881 den Hopkinson'schen Curven von Deprez¹⁾ gegeben. Dass diese Bezeichnung treffend ist, beweist deren allgemeine Anwendung.

Hopkinson beabsichtigte, die zwischen der elektromotorischen Kraft und der Stromstärke bestehende Beziehung darzustellen; er

Unbeständigkeit in ihrem Verhalten, zuweilen verloren sie plötzlich ihren Strom und waren nicht mehr im Stande, sich selbst zu erregen. Diese und andere Eigenheiten konnten erst durch das Studium ihrer charakteristischen Curven verstanden werden.

Die Darstellung der Eigenschaften einer Dynamomaschine mittels der charakteristischen Curve verdanken wir Dr. Hopkinson, welcher 1879 derartige Curven in der »Institution of Mechanical Engineers« beschrieb und die in der Fig. 127 wieder-gegebene Curve einer Maschine von Siemens angab.

1) Vergl. La Lum. électr. 3. Dez. 1881, wo Deprez jedoch eine Beobachtungsmethode angiebt, gegen welche sich einwenden lässt, dass die Gegenwirkungen des Ankers vernachlässigt werden.

nahm deshalb durch Beobachtungen eine Curve auf, deren Abscissen die Stromstärke und deren Ordinaten die entsprechenden Werthe der elektromotorischen Kraft ausdrücken. Die nachstehende Tabelle liefert die beobachteten Werthe der Stromstärke i und der elektromotorischen Kraft E für eine bestimmte Reihenmaschine:

Versuche an einer Maschine von Siemens bei einer Umlaufgeschwindigkeit von 720 Umdrehungen in der Minute.

Stromstärke in Ampere i	Widerstand in Ohm R	Elektromotorische Kraft in Volt E
0,0027	1025	2,72
0,48	8,3	3,95
1,45	5,33	7,73
16,8	4,07	68,4
18,2	3,88	70,6
24,8	3,205	79,5
26,8	3,025	81,1
32,2	2,62	84,4
34,5	2,43	83,8
37,1	2,28	84,6
42,0	2,08	87,4

Es ist zu beachten, dass E die gesammte elektromotorische Kraft der Maschine bedeutet und nicht mit der Klemmenspannung e , die durch einen Spannungsmesser bestimmt wird, verwechselt werden darf. Wir ziehen in vielen Fällen die Benutzung von e anstatt E zur Zeichnung der Curve vor; nach der ursprünglichen Methode von Hopkinson fand dies nicht statt. Er bestimmte i durch Messung und multiplicirte den Werth mit dem Widerstande des gesammten Stromkreises ($iR = E$). Hierzu ist zu bemerken, dass die Maschine eine Reihenmaschine war. Nebenschlussmaschinen waren damals noch nicht in Aufnahme gekommen.

Vor dem Eintritt in andere Erörterungen wollen wir erst die Curve näher betrachten. Sie beginnt an einem etwas oberhalb des Nullpunktes belegenen Punkte. Es zeigt dies das Vorhandensein eines geringen magnetischen Rückstandes in den Feldmagneten. Dann steigt die Curve steil an, rundet sich darauf und nimmt nun einen fast geraden Verlauf, steigt aber sanfter an als vorher.

Wenn nun die Geschwindigkeit gleich bleibt — bei den Versuchen von Hopkinson wurde diese auf 720 Umläufen in der Minute erhalten — so bildet die magnetische Feldstärke die einzige veränderliche Grösse von Bedeutung. Sobald der Magnetismus der

Feldmagnete wächst und sich seinem Maximum nähert, wächst auch die Feldstärke; dasselbe findet auch bezüglich der elektromotorischen Kraft statt. Man könnte deshalb erwarten, führt Hopkinson aus, dass die Curve, welche die Beziehung zwischen der Stromstärke und der elektromotorischen Kraft der Reihenmaschine darstellt, Eigentümlichkeiten in der Gestalt zeigen würde, ähnlich denjenigen der Curve, welche die Beziehung zwischen dem magnetisirenden Strome und der Magnetisirung eines Elektromagnetes angiebt.

Ein Vergleich der Fig. 127 der »Charakteristik« der Reihenmaschine mit der Fig. 86, der »Sättigungscurve« eines Elektromagnetes, wird zur Bestätigung der Analogie hinreichen. Hervorzuheben ist jedoch, dass die Feldstärke nicht nur von der Stärke des Feldmagnetes abhängt, sondern auch durch den in der Ankerwicklung kreisenden Strom beeinflusst wird.

Es lässt sich die Charakteristik einer Maschine durch diese selbst herstellen, indem man mittels zweier Elektromagnete einen Stift über Papier in Bewegung setzt; der eine Elektromagnet wird durch den Hauptstrom erregt, der zweite im Nebenschluss an die Klemmen der Maschine geschaltet.

In der bereits genannten Abhandlung, sowie in einer zweiten in den Proc. Inst. Mech. Engin. im April 1880 veröffentlichten (S. 206), führt Hopkinson eine grosse Anzahl verwendbarer Schlüsse an, welche die Betrachtung solcher Curven liefert. Bezüglich anderer von Deprez gemachter Folgerungen wird auf La Lum. élect. 15. Juni 1884 verwiesen. Auch Dr. Frölich hat mehrere wichtige Abhandlungen über den Gegenstand in der Elektrot. Zeitschrift für 1881 und 1884 veröffentlicht. Dr. Hopkinson nahm den Gegenstand in einer in der Instit. of Civ. Engin. im April 1882 gehaltenen Vorlesung: „Ueber einige Punkte der elektrischen Beleuchtung“ wieder auf. Vergl. auch sein Werk: „The Dynamo-Electric Machines“ (London 1893).

Leistungslinien.

Wie bereits im Eingange dieses Kapitels erwähnt wurde, lässt sich aus der Charakteristik einer Maschine ihre Leistung, ausgedrückt in Pferdekraften entnehmen. Das aus Stromstärke und Spannung gebildete Product ergiebt die elektrische Leistung. Man nennt das Product aus 1 Ampere und 1 Volt Volt-Ampere und mit besonderer Bezeichnung Watt. Ein Watt oder Volt-Ampere ist gleich $\frac{1}{736}$ P (Pferdekraft¹). Um die im Stromkreise von einer

1) Da in dem Werke von Thompson die Leistungslinien nach englischen Horse-Power (HP) aufgetragen sind, so ist in den Figuren das englische Maass beibehalten worden. Ein wesentlicher Unterschied in der Lage der Linien wird dadurch nicht bedingt (1 HP = 746 Watt).

Maschine bei irgend einer Geschwindigkeit, bei Einschaltung einer bestimmten Zahl Lampen entwickelten elektrischen Pferdekkräfte zu berechnen, hat man zwei Messungen vorzunehmen, die Bestimmung der Anzahl Volt und der Stromstärke in Ampere. Das Product dividirt durch 736 ergibt die Pferdestärken. Ist jedoch die Charakteristik der Maschine bei einer bestimmten Geschwindigkeit bekannt, so ergibt ein Blick auf die Curve, welche elektromotorische

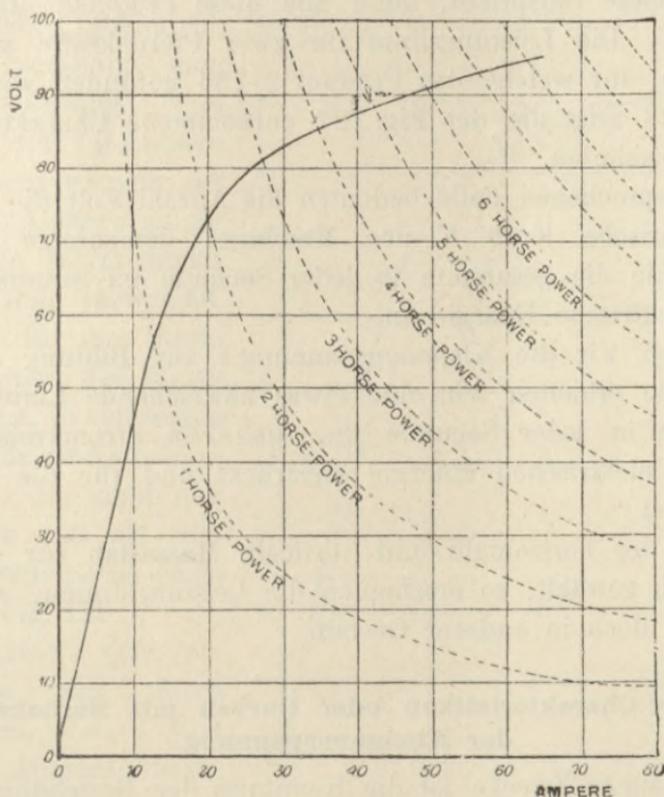


Fig. 128. Charakteristik mit Leistungslinien.

Kraft irgend einer Stromstärke entspricht. Nehmen wir als Beispiel die von Hopkinson untersuchte Siemens'sche Maschine, deren charakteristische Curve in der Fig. 127 dargestellt ist. Es liefere diese Maschine bei einem bestimmten Widerstande und bei 720 Umdrehungen 30 Ampere, so ergibt sich als elektromotorische Kraft der Werth 83. Daher ist

$$\frac{83 \cdot 30}{736} = 3,3 \text{ P.}$$

Um nun derartige Berechnungen zu vermeiden, fügen wir zu dem Diagramm einige die Charakteristik schneidende Curven hinzu,

die bei verschiedenen elektrischen Bedingungen gleichen Pferdekräften entsprechen.

Diese »Leistungslinien« sind rechtwinkelige Hyperbeln. So geht z. B. die Leistungslinie für 1 P durch sämtliche Punkte, für welche das Product Volt \times Ampere gleich 736 ist, also durch den Punkt, welcher 73,6 Volt und 10 Ampere entspricht, ferner durch den Punkt, der 36,8 Volt und 20 Ampere und der 14,72 Volt und 50 Ampere entspricht, denn alle diese Producte ergeben den Werth 736. Die Leistungslinie für zwei Pferdekräfte geht durch alle Punkte, für welche das Product $2 \cdot 736$ gefunden wird u. s. w. Die Fig. 128 zeigt die der Fig. 127 entnommene Charakteristik mit den Leistungslinien.

Im besprochenen Falle bedeuten die Anzahl Volt die gesammte elektromotorische Kraft E der Maschine; demzufolge giebt die Leistungslinie die gesammte in jeder Secunde im Stromkreise umgesetzte elektrische Energie an.

Würden wir die Klemmenspannung e zur Bildung der Curve benutzen, so erhielten wir eine etwas abweichende Linie, die den Betrag der in jeder Secunde im äusseren Stromkreise hervorbrachten elektrischen Energie ausdrückt und für die Nutzarbeit verfügbar ist.

Wird der horizontale und verticale Maassstab für die Curve nicht gleich gewählt, so erscheinen die Leistungslinien, wengleich Hyperbeln, doch in anderer Gestalt.

„Aeussere“ Charakteristiken oder Curven mit Berücksichtigung der Klemmenspannung.

Für manche Zwecke ist die Kenntniss der Beziehung zwischen Stromstärke und Klemmenspannung dienlicher als die Kenntniss der Beziehung zwischen der Stromstärke und der gesammten im Anker inducirten elektromotorischen Kraft; es bietet auch die Messung der Grösse e weniger Schwierigkeiten als die Bestimmung von E , denn jene Grösse lässt sich unmittelbar bestimmen, die letztere nur mittelbar. Man kann die Bezeichnung »äussere Charakteristik« der Unterscheidung halber denjenigen Curven beilegen, welche die Beziehung zwischen der Klemmenspannung und der Stromstärke im äusseren Kreise darstellen. Bei der Reihenmaschine wird die Ableitung einer dieser Curven aus der anderen leicht, sobald der innere Widerstand des Ankers und des Feldmagnetes bekannt ist. Die von Hopkinson im Jahre 1879 untersuchte Siemens'sche Maschine,

deren Charakteristik in den Fig. 127 und 128 dargestellt ist, besass einen inneren Widerstand von 0,6 Ohm. In der Fig. 129 wird diese Curve zum dritten Male, mit E bezeichnet, dargestellt. Soll ein Strom von 10 Ampere geliefert werden, so muss man berücksichtigen, dass zur Ueberwindung von 0,6 Ohm eine Spannung von 6 Volt erfordert wird; wir ersehen aus der Curve, dass die einer Stromstärke von 10 Ampere entsprechende elektromotorische Kraft etwa 46,5 Volt beträgt. Hiervon werden 6 Volt zur Ueberwindung des inneren Widerstandes gebraucht, und es verbleibt eine Klemmenspannung von 40,5 Volt. Bei 50 Ampere werden nicht weniger als 30 Volt zur Ueberwindung des inneren Widerstandes von 0,6 Ohm verwendet, und da E für den Strom von 50 Ampere den Werth 90,5 Volt hat, so verbleiben 60,5 Volt für die Klemmenspannung. Es giebt nun zwei Wege dies als Diagramm darzustellen, beide zeigt die Fig. 129.

Die Linie J geht vom Nullpunkte aus durch die Punkte, die 6 Volt und 10 Ampere bzw. 30 Volt und 50 Ampere entsprechen. (Die Tangente der Neigung dieser Linie ist $= 6/10 = 0,6$. Wir werden später sehen, dass dadurch der innere Widerstand sich ergibt.) Wenn wir durch die Ordinaten der Linie E die überhaupt inducirten elektromotorischen Kräfte darstellen und durch die Ordinaten der Linie J die zur Ueberwindung des inneren Widerstandes erforderliche Spannung ausdrücken, so folgt daraus, dass die Klemmenspannung durch die Differenz der zugehörigen Ordinaten der Linien E und J gegeben ist.

In dieser Weise lässt sich zunächst die Klemmenspannung darstellen. Man kann ebenso von den oberen Enden der Ordinaten

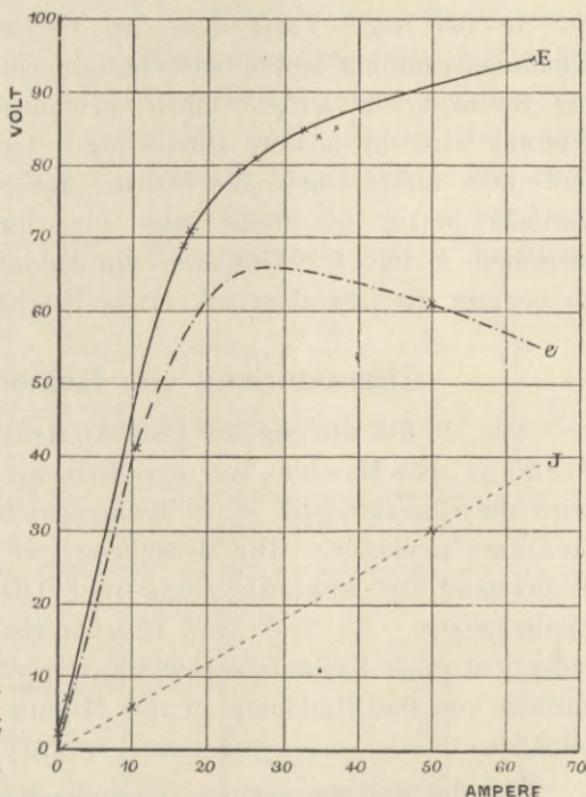


Fig. 129. Gesamte und äussere Charakteristik.

Theile, die den zugehörigen Ordinaten von J gleich sind, abschneiden. Dies läuft darauf hinaus, die im inneren Widerstande verbrauchte Spannung, die nach der algebraischen Theorie gleich $i(r_a + r_m)$ ist, von E zu subtrahiren, um so die Werthe von e zu erhalten. Die letzteren werden durch die Curve » e « dargestellt; da diese die Spannungen für den äusseren Kreis ergibt, so nennt man die Curve die »äussere Charakteristik« oder die »Curve der Klemmenspannung«.

In der Regel kehrt man den Vorgang um. Die Werthe der Klemmenspannung lassen sich mittels eines Spannungsmessers und die Stromstärken mittels eines Strommessers bequem beobachten. Hieraus wird die äussere Curve für e dargestellt; fügt man zu den Ordinaten dieser Curve die Werthe der entsprechenden Spannungsverluste hinzu, so erhält man die Curve für die Beziehungen zwischen E und i . Enthalten die Feldmagnete Dauermagnetismus, so beginnt die Charakteristik etwas oberhalb des Nullpunktes.

Charakteristik von Reihenmaschinen.

Die zur Darstellung der Charakteristik für die Fig. 127 benutzte Siemens'sche Maschine war eine Reihenmaschine. Aus der Fig. 130 wird die Charakteristik einer Reihenmaschine des Musters »A« von Gramme ersichtlich. Die Messungen von Deprez ergaben 0,41 Ohm Widerstand der Ankerwicklung und 0,61 Ohm der Wickelung des Feldmagnetes. Es sind zwei Charakteristiken gezeichnet, die eine entspricht einer Umlaufgeschwindigkeit von 1440, die andere einer solchen von 950 Umläufen in der Minute. Die Leistungslinien sind punktirt.

Bei der Reihenmaschine steigt die Magnetisirung mit der Stromstärke an, und deshalb wächst auch zuerst die elektromotorische Kraft; die Curve zeigt deshalb einen in gerader Linie ansteigenden Theil. Sobald der Magnet sich der Sättigung nähert, wendet sich die Curve, und sobald die vom Ankerstrom herrührenden Gegenwirkungen einen verhältnissmässig hohen Werth erlangen, flacht sie sich ab und wendet sich endlich wieder abwärts.

Wenn starke Ströme den Anker durchfliessen, trägt ein Umstand zur Verminderung der elektromotorischen Kraft bei: sind nämlich die Feldmagnete nicht verhältnissmässig sehr kräftig, so führt die quermagnetisirende Wirkung des Ankerstromes eine bedeutende Lagenänderung des neutralen Punktes herbei und bedingt eine

wesentliche Bürstenverschiebung. Die entmagnetisirende Wirkung des Ankers auf die Feldmagnete steigt deshalb stark an. Das Abfallen der Curve zeigt sich bei schwachen Feldmagneten stets grösser. Dasselbe tritt auch meistens bei solchen Maschinen ein, in denen der Ankerkern sich näher dem Sättigungspunkte befindet, als die Kerne der Feldmagnete; denn sobald der Ankerkern durch starke Ströme gesättigt wird, entsteht eine verhältnissmässig stärkere magnetische Zerstreung zwischen den Polstücken.

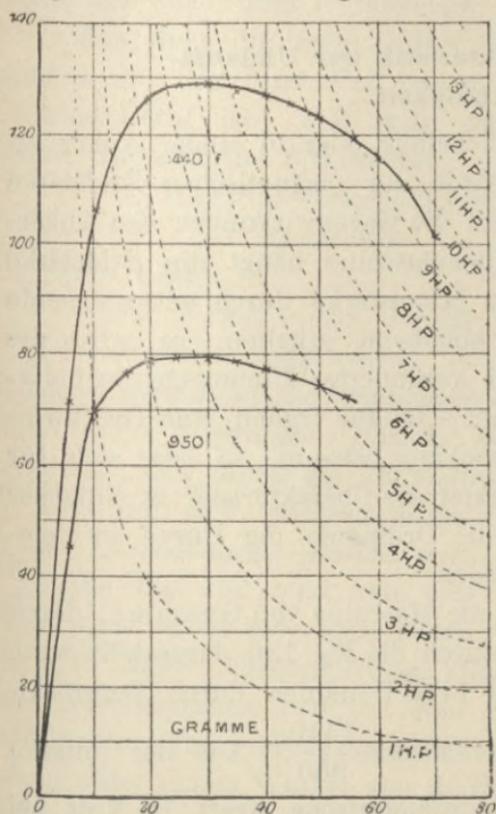


Fig. 130. Charakteristik bei verschiedenen Geschwindigkeiten.

Eine weitere Curve einer Reihenmaschine zeigt die Fig. 131. Dieselbe ist einer kleinen Maschine von Brush (für eine einzelne Bogenlampe), und zwar dem älteren Muster mit massivem Eisenringe entnommen. Mit Rück-

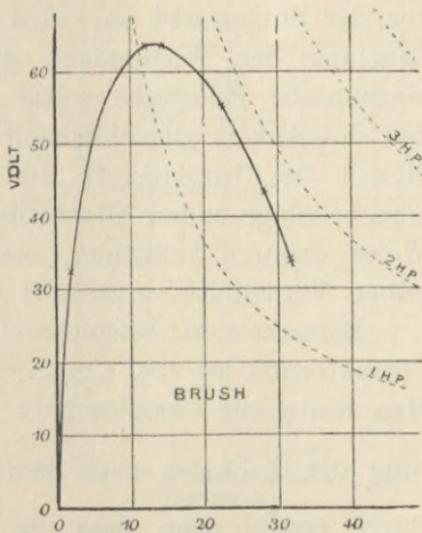


Fig. 131. Abfallende Charakteristik (1150 Umläufe).

sicht auf die besondere Anordnung der Wicklung machen sich die Gegenwirkungen des Ankers durch ein sehr starkes Abfallen der Charakteristik bemerkbar. Zum Theil rührt dies von der Anordnung her, dass ein Paar Wicklungen bei der Annäherung an den neutralen Punkt ausgeschaltet werden. Die grösste Leistung dieser kleinen Maschine beträgt 1,75 P; dieser Werth wird nur erreicht, wenn die Gegenwirkungen sich schon eingestellt haben. Die bedeutende Verminderung der elektromotorischen Kraft, die eintritt, sobald man von der Maschine eine übermässige Leistung verlangt, ist in

Wirklichkeit ein Vortheil. Sollte die Maschine während des Betriebes zufällig kurz geschlossen werden, so verhindert die Gegenwirkung des Ankers eine übergrosse Stromstärke, infolge deren die Wickelung sich stark erhitzen könnte. Zur Speisung von Bogenlampen, für die eine nahezu gleichbleibende Stromstärke Erforderniss bildet, ist es als Vortheil zu betrachten, wenn Maschinen mit abfallenden Charakteristiken zur Verwendung gelangen, und zwar muss die Maschine im Bereiche des abfallenden Theiles der Curve arbeiten.

Beziehung der Charakteristik zur Umlaufgeschwindigkeit.

Die in einer umlaufenden Wickelung oder in einem Anker erzeugte elektromotorische Kraft würde der magnetischen Feldstärke genau proportional sein, wenn nicht die Gegenwirkungen des Ankerstromes einträten. In einer Reihenmaschine hängt die Feldstärke von der Stromstärke ab; wird die Stromstärke durch entsprechende Regelung der Widerstände gleichbleibend erhalten, so wird die magnetische Feldstärke selbst bei veränderter Umlaufgeschwindigkeit des Ankers gleichbleibend sein. Ist für irgend eine Geschwindigkeit die Charakteristik der Maschine bekannt, so lässt sich für eine beliebige andere Geschwindigkeit die Charakteristik in einfacher Weise dadurch herstellen, dass die Ordinaten der Curve in demselben Verhältniss vergrössert werden.

Betrachten wir beispielsweise die Maschine von Gramme, deren Charakteristik bei 950 Umläufen durch die Fig. 130 dargestellt wird. Man findet die Charakteristik bei 1440 Umläufen durch Vergrösserung der Ordinaten nach dem Verhältniss $\frac{1440}{950}$. Aus der unteren

Curve ersieht man, dass die elektromotorische Kraft 79 Volt bei einer Stromstärke von 20 Ampere betrug. Danach ergibt sich

$79 \cdot \frac{1440}{950} = 119,7$ Volt. Die bei 1440 Umläufen und einer Strom-

stärke von 20 Ampere beobachtete wirkliche elektromotorische Kraft beträgt aber 127 Volt. Dies ist eine geringe Abweichung, die stets vorkommt. Denn Dynamomaschinen verhalten sich derartig, als ob eine gewisse Zahl von Umläufen für den elektrischen Vorgang nicht in Rechnung gezogen werden kann. Würde die Zahl dieser sogen. »todten Umläufe« im vorliegenden Falle mit 140 gerechnet, so würde die theoretisch berechnete Zahl der Volt genau mit der beobachteten stimmen.

Ableitung des Widerstandes aus der Charakteristik.

In der Charakteristik erscheint die Zahl der Volt als Ordinate, die Zahl der Ampere als Abscisse. Nach Ohm's Gesetz ergibt Volt dividirt durch Ampere den Widerstand in Ohm. Es soll der Widerstand des Stromkreises für irgend eine Stromstärke mittels der Charakteristik gefunden werden. Die Fig. 132 möge die fragliche Charakteristik der Maschine sein. Wir wollen nun den Widerstand für den Punkt P darstellen.

Man ziehe die Ordinate PM und verbinde P mit dem Anfangspunkte O . Die Linie PO besitzt eine bestimmte Neigung, deren Winkel POM ist. PM stellt die Grösse der elektromotorischen Kraft dar, OM die Stromstärke. Der Widerstand ist demnach

$$\frac{\text{Elektromotorische Kraft}}{\text{Stromstärke}} = \frac{PM}{OM} = \text{tg } POM.$$

Das heisst:

Der irgend einem Punkte der Charakteristik entsprechende Widerstand wird durch die trigonometrische Tangente desjenigen Winkels dargestellt, der durch die Verbindungslinie mit dem Anfangspunkte und der Abscissenachse gebildet wird.

Die Fig. 132 zeigt, wie sich die Tangenten leicht berechnen lassen. In dem 10 Ampere entsprechenden Punkte der Abscissenachse errichtet man eine Ordinate. Vom Anfangspunkte wird dann unter einem Winkel von 45 Grad

(dessen $\text{tg} = 1$) eine Linie gezogen, welche die Ordinate gegenüber dem Punkte für 10 Volt schneidet. Die Lage dieses Punktes entspricht also dem Werthe von 1 Ohm, und hiernach lässt sich eine Widerstandsscala auftragen. In der Fig. 132 schneidet die Linie PO von dieser Scala ein Stück etwa gleich 1,2 Ohm ab. Da P bei 51,3 Volt liegt und die Stromstärke 43,2 Ampere ist, so erhalten wir durch Division 1,18 Ohm. Derartige Berechnungen werden durch die graphische Darstellung erspart.

Wird der Widerstand des Stromkreises der Maschine nach und nach vergrössert, so müssten wir den Punkt P der Curve entlang rückwärts nach dem Anfangspunkte zu verschieben; Spannung und Stromstärke würden abfallen, während die Steigung der Linie OP

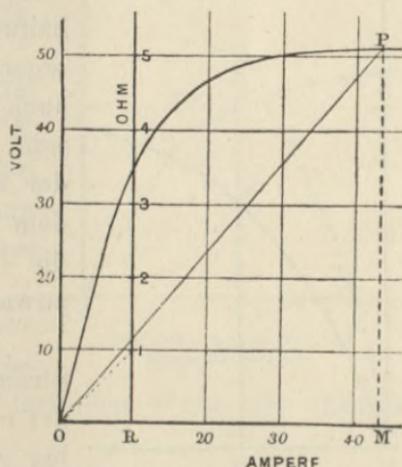


Fig. 132. Graphische Darstellung des Widerstandes.

zunahme. Bei einer gewissen Steigung bildet OP praktisch eine Tangente an den fast geraden Theil der Curve; bei einem sehr geringen Anwachsen des Widerstandes würde dann die Maschine ihren Magnetismus verlieren, weil es an Strom zur Magnetisirung mangelt.

Man kann den Widerstand in der Charakteristik jeder Dynamomaschine in ähnlicher Weise darstellen; wenn indes in diesem Falle die Charakteristik die Beziehung zwischen der Stromstärke im äusseren Kreise und der Klemmenspannung darstellt, so ergibt sich auch der äussere Widerstand.

Beziehung der Charakteristik zur Ankerwicklung und Magnetwicklung.

Es möge nun der Anker einer Maschine mit einer grösseren Zahl von Windungen aus entsprechend dünnerem Drahte versehen werden. Was wird sich dann bei Innehaltung derselben Umlaufsgeschwindigkeit ergeben? Der Widerstand ist etwas grösser, auch wird die elektromotorische Kraft grösser sein. Es stelle die Fig. 133 die Charakteristik der Maschine dar, als sie X Windungen auf dem Anker besass. Wie ändert sich nun die Curve, wenn die Windungen auf X' anwachsen?

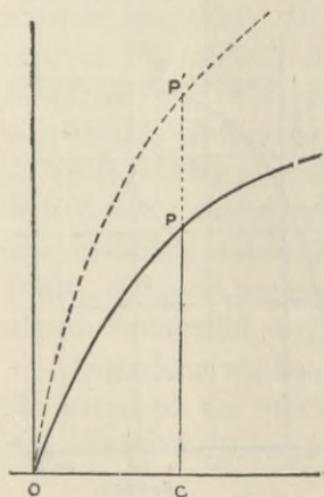


Fig. 133. Aenderung der Ankerwicklung.

P sei ein Punkt, der einer bestimmten Stromstärke entspricht. Nach Herstellung der neuen Wickelung möge der Widerstand bis zur Erreichung derselben Stromstärke verändert werden. Die Magnete werden in diesem Falle ebenso stark als vorhin magnetisirt;

indessen schneiden nun X' Windungen anstatt X Windungen die Kraftlinien. Die elektromotorische Kraft wird demnach in dem Verhältniss $\frac{X'}{X}$ grösser sein. Man ziehe deshalb die Linie $P'C$, so dass

$$P'C : PC = X' : X.$$

Sämmtliche anderen Punkte der neuen Curve können durch Vergrösserung der Ordinaten nach demselben Verhältniss gewonnen werden.

Hieraus ist ersichtlich, dass die Vergrösserung der Windungszahl der Ankerwicklung dieselbe Wirkung ausübt wie die Erhöhung der Umlaufgeschwindigkeit. Maschinen mit geringer Umlaufszahl

(wie solche zum Gebrauch auf Schiffen u. s. w. erforderlich sind) können die erforderliche elektromotorische Kraft liefern, wenn die Zahl der Windungen entsprechend erhöht wird. Dies bedingt aber eine Einbusse mit Rücksicht auf die Wirthschaftlichkeit, und zwar wegen der Vergrößerung des Ankerwiderstandes.

Die aus Anlass einer Aenderung der Windungszahl der Feldmagnetwicklung eintretende Wirkung kann man gleichfalls aus der Charakteristik entnehmen. Es sei die Zahl der Windungen auf dem Magnete zuerst S , und es mögen dann S' Windungen aufgelegt werden. Wir werden gleiche elektromotorische Kräfte bei derselben Umlaufzahl erhalten, wenn der Magnet in beiden Fällen in gleichem Grade magnetisirt wird. Wenn aber der Strom S' mal anstatt S mal kreist, so haben wir nur einen $\frac{S}{S'}$ mal so starken Strom als vorhin nothwendig, um den gleichen Magnetismus zu erzeugen.

Um die neue Charakteristik (Fig. 134) zu erhalten, ziehe man die Linie PE . $PE = CO$ entspricht der Stromstärke bei der elektromotorischen Kraft E . Dann ist der Punkt P' so zu bestimmen, dass

$$P'E : PE = S : S'$$

ist. P' bildet nun einen Punkt der neuen Charakteristik. Durch entsprechende Berechnung der Abscissen kann man in derselben Weise alle anderen Punkte finden.

Beide beschriebene Verfahren können auf Charakteristiken von Nebenschlussmaschinen nicht angewendet werden.

Kritische Stromstärke einer Reihenmaschine.

Aus der Thatsache, dass die Charakteristiken für verschiedene Geschwindigkeiten nur in der Scala der Ordinaten sich unterscheiden, kann eine wichtige Folgerung gezogen werden. Der untere Theil einer jeden Charakteristik für irgend eine Geschwindigkeit ist beinahe gerade bis zu einem Punkte, wo bei der betreffenden Geschwindigkeit die elektromotorische Kraft etwa $\frac{2}{3}$ ihres grössten Werthes beträgt. Sobald die Stromstärke derartig ist, dass die elektromotorische Kraft diesen Werth erlangt, bringt jede sehr geringe Aenderung der Geschwindigkeit oder des Widerstandes im Stromkreise eine bedeutende Aenderung der elektromotorischen Kraft und

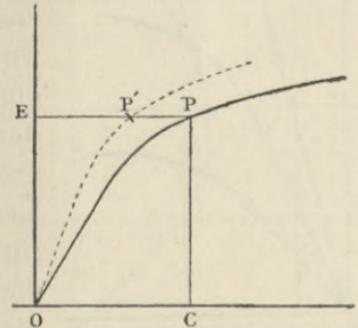


Fig. 134. Aenderung der Magnetwicklung.

demzufolge auch der Stromstärke hervor. Da dieser kritische Fall (vergl. Fig. 135) stets bei derselben Stromstärke eintritt, so kann man diesen Strom — der dem Punkte entspricht, wo der gerade Theil der Curve sich zu krümmen beginnt — den kritischen Strom oder die kritische Stromstärke der Maschine nennen. Dies ist die Erklärung für die oben auf Seite 184 erwähnte auffallende Unbeständigkeit. Die Reihenmaschine erregt sich selbst nur, wenn der Widerstand niedrig genug ist, und verliert ihren Magnetismus während des Ganges, wenn der Widerstand des Stromkreises zu sehr ansteigt.

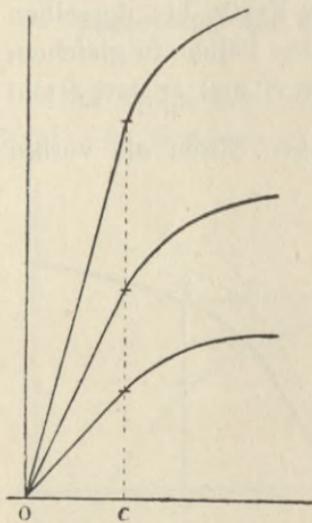


Fig. 135. Aenderung der Geschwindigkeit.

Jede Maschine zeigt eine besondere kritische Stromstärke und arbeitet nicht gut mit einer geringeren, weil eine geringere die Feldmagnete nicht genügend magnetisirt. Man ersieht auch, obgleich die Charakteristik für jede Geschwindigkeit entsprechend ansteigt, dass für jeden Werth der Geschwindigkeit doch ein besonderer Widerstand sich findet, für den der kritische Strom erreicht wird; je grösser die Geschwindigkeit ist, um so höher kann dieser Widerstand liegen. Einen an und für sich kritischen Widerstand giebt es nicht; denn ob ein Widerstand kritisch ist oder nicht, hängt von der Geschwindigkeit ab.

Es giebt auch keine an und für sich kritische Geschwindigkeit für eine Reihenmaschine, denn ob die Geschwindigkeit kritisch ist oder nicht, hängt vom Widerstande des Stromkreises ab.

Charakteristik der Nebenschlussmaschine.

Für die Nebenschlussmaschine giebt es zwei besondere Charakteristiken; die äussere Charakteristik als Beziehung zwischen der Stromstärke im äusseren Kreise und der Klemmenspannung, und die innere Charakteristik als Beziehung zwischen der Stromstärke und Spannung für den Nebenschlusskreis. Die innere Charakteristik einer Nebenschlussmaschine ist der äusseren Charakteristik einer Reihenmaschine sehr ähnlich und zeigt die Sättigung der Feldmagnete. Es erscheint zweckmässiger, zur Darstellung Ampere-Windungen anstatt Ampere zu benutzen, weil die Magnetisirung sowohl von der Anzahl der Windungen als von der Stromstärke abhängt.

Die äussere Charakteristik einer Siemens'schen Nebenschlussmaschine (dieselbe, welche von Sir W. Siemens in der Royal Society im Jahre 1880 und von A. Siemens in dem Journ. Soc. Telegr. Eng., März 1880, beschrieben wurde) ist in der Fig. 136 dargestellt, in der auch die Leistungslinien verzeichnet sind.

Die äusserste Leistung der Maschine bei 630 Umläufen fand sich gerade unterhalb 2 P mit einer Stromstärke von 30 Ampere und einer Spannung von 47,5 Volt.

Die Curve der Nebenschlussmaschine unterscheidet sich in eigenthümlicher Weise von der Curve der Reihenschlussmaschine. Sie beginnt mit einem geraden oder nahezu geraden Theile, der in Krümmung übergeht und am Ende beinahe horizontal zur Ordinatenachse (der elektromotorischen Kraft) zurückführt. Der gerade Theil zeigt den veränderlichen Zustand, wenn die Stromstärke im Nebenschlusse sich unterhalb ihres wirklichen kritischen Werthes befindet.

Die äussere kritische Stromstärke, wenn man diese Bezeichnung anwenden darf, tritt dann ein, wenn der Nebenschluss in vollem Maasse zu wirken beginnt; in der Fig. 136 erfolgt dies bei einer Stromstärke von etwa 30 Ampere. Die Neigung der Linie, die den untersten Theil der Charakteristik bildet, stellt den Widerstand dar, den man für die betreffende Geschwindigkeit den kritischen Widerstand nennen kann; derselbe beträgt im vorliegenden Falle etwa 1 Ohm. Durch einen geringeren Widerstand können die Magnete ihren Magnetismus plötzlich verlieren. Bei einem grösseren Widerstande

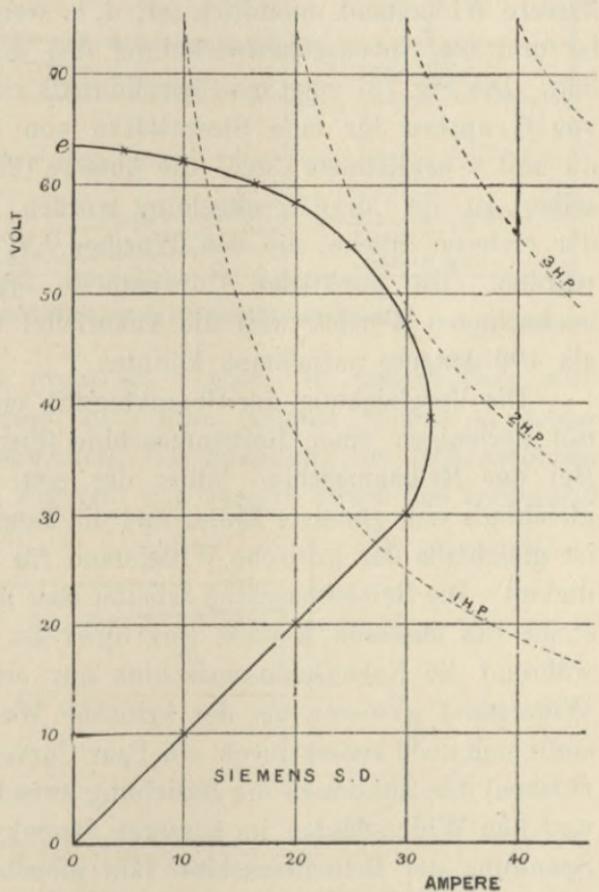


Fig. 136. Aeussere Charakteristik der Nebenschlussmaschine.

steigt plötzlich die elektromotorische Kraft über den kritischen Werth — im vorliegenden Falle 30 bis 31 Volt. Wird der Widerstand des äusseren Kreises in geringster Weise geändert, so ändern sich Stromstärke und elektromotorische Kraft bedeutend. Wird der Widerstand stetig vergrössert (d. h. die Steigung der Linie von O aus nach dem gekrümmten Theile erhöht), so steigt die elektromotorische Kraft beständig an und wird ein Maximum, wenn der äussere Widerstand unendlich ist, d. h. wenn der Stromkreis geöffnet ist und die Nebenschlusswicklung den gesammten Ankerstrom erhält. Die Fig. 137 zeigt die Charakteristik einer Nebenschlussmaschine von Gramme für eine Stromstärke von 400 Ampere. Hier stellt die mit e bezeichnete Curve die äussere Charakteristik dar; aus derselben ist die Curve E abgeleitet worden, indem zu den Ordinaten der ersteren Stücke, die den Werthen $r_a i_a$ entsprechen, hinzugefügt wurden. Die punktirten Curventheile ergeben die nicht wirklich beobachteten Werthe, weil die Ankerleiter mit Sicherheit nicht mehr als 400 Ampere aufnehmen konnten.

Die Vergleichung der Charakteristik einer Nebenschlussmaschine mit derjenigen einer Reihenmaschine (Fig. 127) ist sehr belehrend. Bei der Reihenmaschine bildet der erste Theil der Charakteristik gleichfalls eine geneigte Linie, und die Tangente des Neigungswinkels ist gleichfalls der kritische Widerstand für die betreffende Geschwindigkeit. Die Reihenmaschine arbeitet aber nur dann, wenn der Widerstand des äusseren Kreises geringer ist als der kritische Werth, während die Nebenschlussmaschine nur arbeitet, wenn der äussere Widerstand grösser als der kritische Werth ist. Der Unterschied stellt sich noch besser durch ein Paar Curven (jedoch keine Charakteristiken) dar, aus denen die Beziehung zwischen der Klemmenspannung und den Widerständen im äusseren Stromkreise ersichtlich wird. Die Spannung der Reihenmaschine fällt plötzlich ab, sobald der Widerstand 2 Ohm übersteigt, die der Nebenschlussmaschine steigt plötzlich, sobald der Widerstand 1 Ohm erreicht (vergl. Fig. 138 und 139).

Bei verdoppelter Geschwindigkeit kann man die Charakteristik einer Nebenschlussmaschine nicht dadurch erhalten, dass man wie bei der Reihenmaschine die Höhen der Ordinaten verdoppelt. Wenn man auch bei doppelter Geschwindigkeit den äusseren Widerstand so regelt, dass dieselbe Stromstärke im äusseren Kreise wie vorher erhalten wird, so verdoppelt sich die elektromotorische Kraft keineswegs, denn wir erhalten in dem Nebenschlusse nicht dieselbe Stromstärke, wie im ersten Falle. Regeln wir anderseits den Widerstand

so, dass im Nebenschlusse dieselbe Stromstärke wie im ersteren Falle herrscht und die elektromotorische Kraft doppelt so gross wird, so erhalten wir nicht dieselbe Stromstärke im äusseren Kreise wie vorher. Wenn wir indessen den äusseren Widerstand ändern und einen stärkeren Strom im Aussenkreise herbeiführen, so dass der Strom im Nebenschlusse auf seinen ersten Werth gebracht wird, so bleibt

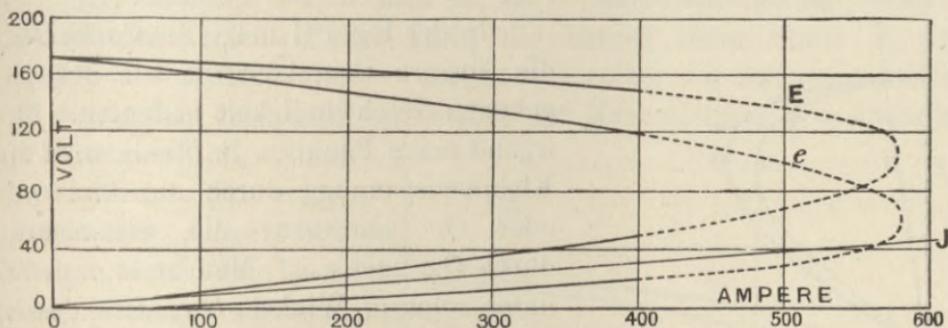


Fig. 137. Charakteristik einer Nebenschlussmaschine.

die Magnetisirung ebenso gross als vorher. In diesem Falle wird die doppelte Geschwindigkeit auch eine beinahe doppelt so grosse elektromotorische Kraft bewirken, die Spannung am Nebenschlusse kann wie vorhin bleiben, während der äussere Strom fast verdoppelt

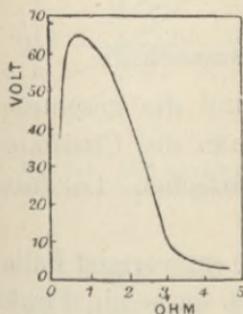


Fig. 138. Reihenmaschine.

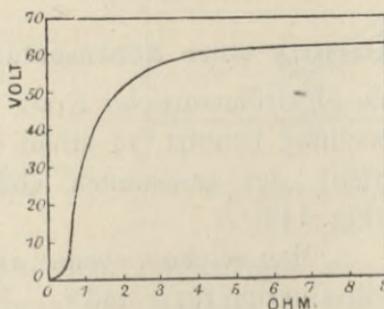


Fig. 139. Nebenschlussmaschine.

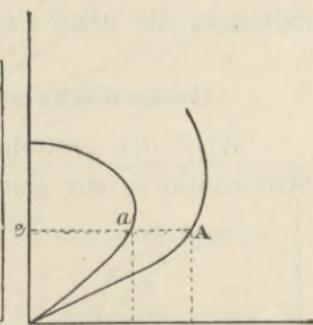


Fig. 140. Nebenschlussmaschine bei Verdoppelung der Geschwindigkeit.

wird. Die Fig. 140 stellt dieses dar; ea bedeutet die äussere Stromstärke im ersteren Falle und eA die Stromstärke im zweiten Falle. OA bleibt eine gerade Linie, deren Neigungswinkel bei der höheren Geschwindigkeit indessen geringer ist. Aus diesem letzteren Umstande ist ersichtlich, dass bei höheren Geschwindigkeiten der Widerstand auf einen geringeren Werth gebracht werden kann, ehe der kritische Zustand erreicht wird, bei dem die Maschine stromlos wird, d. h. die Feldmagnete den Magnetismus verlieren.

Curve des gesammten Ankerstromes.

In der Nebenschlussmaschine ist der Ankerstrom gleich der Summe der Ströme im äusseren Kreise und im Nebenschlusse, oder

$$i_a = i + i_s.$$

Die Curve der Beziehung zwischen i_a und e kann man leicht erhalten.

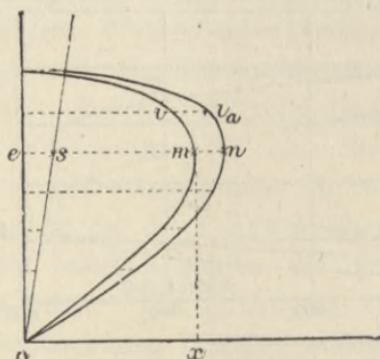


Fig. 141. Ankerstrom der Nebenschlussmaschine.

In der Fig. 141 möge die Curve Omi die äussere Charakteristik bei der gegebenen Geschwindigkeit bedeuten. Für irgend einen Punkt, z. B. für m , wird die Klemmenspannung durch die Linie mx oder Oe gemessen, die Stromstärke durch Ox oder em . Man zieht nun sO unter solchem Winkel sOx , dass dessen Tangente gleich dem Widerstande des Nebenschlusses ist. Dann stellt es die Stromstärke im Nebenschlusse bei der Spannung Oe dar. Zu em wird jetzt ein Stück mn gleich es zugefügt, so bedeutet die Linie en den Ankerstrom i_a bei der Spannung Oe . Durch ähnliche Aufsuchung entsprechender Punkte erhält man die neue Curve Oni_a .

Gesamtcharakteristik einer Nebenschlussmaschine.

Wird die gesammte elektromotorische Kraft und die gesammte Stromstärke i_a zur Darstellung benutzt, so erhält man die Charakteristik der gesammten elektrischen Leistung (Fig. 142).

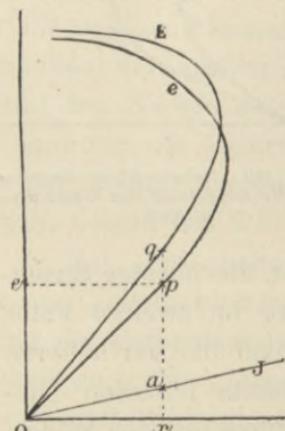


Fig. 142. Nebenschlussmaschine.

Man zeichne, ebenso wie im vorigen Falle, die Curven für e und i_a . Es sei p ein Punkt für die Spannung px oder Oe und die Stromstärke ep oder Ox . Man zieht nun eine Linie OJ unter einem Winkel JOx , dessen Tangente der Grösse des Ankerwiderstandes entspricht. Der Schnittpunkt von JO und px sei a . Dann stellt ax den Spannungsverlust im Anker dar. Fügt man ein Stück qp gleich ax der Linie px hinzu, so bedeutet qx die gesammte elektromotorische Kraft, wenn die Stromstärke i_a dem Werth Ox entspricht.

Charakteristik einer Nebenschlussmaschine mit Dauermagnetismus.

Ist in den Feldmagneten ein magnetischer Rückstand vorhanden, so wird elektromotorische Kraft schon vor dem Schlusse des Nebenschlusses inducirt. Die Charakteristik würde dann bei einem Punkte V (Fig. 143) beginnen.

Die Maschine verhält sich so, als ob schon eine geringe elektromotorische Kraft wirksam wäre, die bereits einen Strom in der Maschine veranlasst; letztere erregt sich selbst mit Strömen, welche in den ersten (und unstenen) Stufen der Magnetisirung den Ampere-Windungen im Nebenschlusskreise, plus einigen imaginären Ampere-Windungen, welche dem Dauermagnetismus entsprechen, proportional sind.

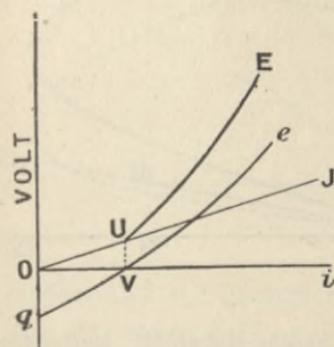


Fig. 143. Nebenschlussmaschine mit Dauermagnetismus.

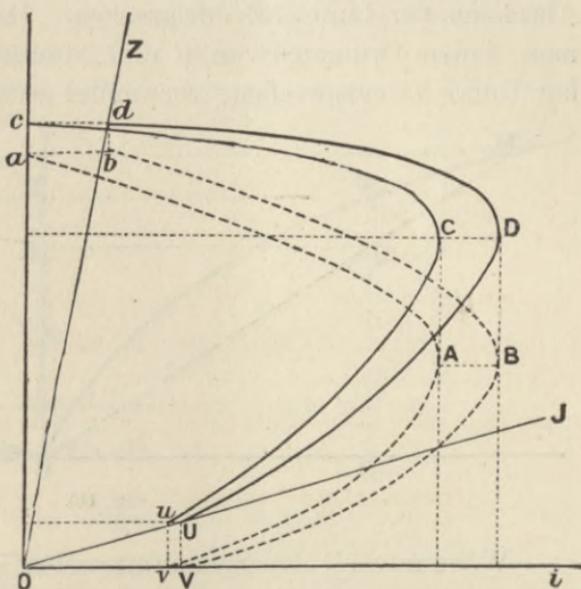


Fig. 144. Vier Curven einer Nebenschlussmaschine.

Wenn sich auf dem Feldmagnete eine zweite Wickelung befindet, mittels deren eine unabhängige Magnetisirung herbeigeführt werden kann, so wird dasselbe Ergebniss erzielt: die Charakteristik beginnt bei irgend einem Punkte, etwa bei V , die elektromotorische Kraft aus den Ampere-Windungen des Nebenschlusses wird oberhalb O gezeichnet, während Oq unterhalb denjenigen Theil der elektromotorischen Kraft bedeutet, der den Ampere-Windungen (wirklichen oder imaginären) des unabhängigen Magnetismus entspricht; OV bedeutet dann die von der kurz geschlossenen Maschine gelieferte Stromstärke.

In Wirklichkeit giebt es vier Curven für eine Nebenschlussmaschine, und zwar für die Beziehungen zwischen e und i , e und i_a ,

E und i , endlich zwischen E und i_a . Die erstgenannte bildet die äussere, die vierte die Gesamtcharakteristik.

Unter den Bezeichnungen A , B , C und D ersieht man die vier Curven aus der Fig. 144. Ist D gegeben, so erhält man die anderen in folgender Weise:

Es möge die Neigung der Linien OJ und OZ den Widerstand des Ankers und des Nebenschlusses ergeben. Dann wird die Curve B aus D erhalten, indem man von den Ordinaten Stücke abschneidet gleich den Ordinaten, die zu OJ gehören. Die Curve C erhält man aus D , indem man von den Abscissen Theile abschneidet, die den Abscissen der Linie OZ entsprechen. Die Curve A endlich gewinnt man, indem Ordinaten von B und Abscissen von C , die den Punkten der Curve D entsprechen, verwendet werden.

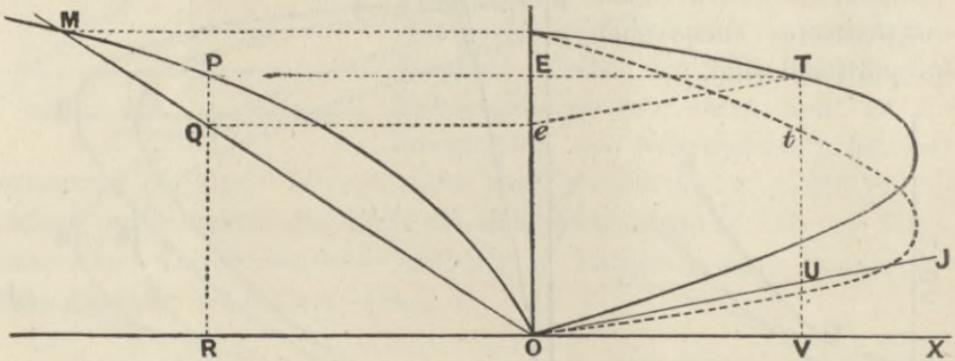


Fig. 145.

Während DB den Spannungsverlust im Anker darstellt, bedeutet CD die Stromstärke in den Wicklungen des Feldmagnetes. Je geringer der Ankerwiderstand und je grösser der Widerstand des Nebenschlusses ist, desto geringer wird der genannte Verbrauch sein. Bei einer zweckmässig gebauten Maschine liegen die vier Curven nahe bei einander.

Ist die Magnetisirungcurve der Maschine bekannt, so ist die Bestimmung der Charakteristik mittels geometrischer Construction nicht schwer. Die Magnetisirungcurve OPM soll die Beziehung zwischen \mathcal{C} und den Ampere-Windungen im Nebenschlusse, nach unserer Bezeichnung Ni_s , darstellen (Fig. 145).

Die Curve links von O sei die Magnetisirungcurve. Dann kann man die Linie OR entweder nach einer die Zahl der Ampere-Windungen oder der Ampere bedeutenden Scala theilen, so dass N Theile der ersteren Scala einem Theile der letzteren entsprechen. Die senkrecht zu zeichnende Scala auf OE kann in ähnlicher Weise \mathcal{C}

oder E angeben; $ni \cdot 10^{-8}$ ist das Verhältniss der Ablesungen der Scalen. Man zieht nun die Linie OM unter einem solchen Winkel zu OR , dass die Tangente in den gewählten Einheiten der Scalentheile dem Widerstande der Nebenschlusswicklung entspricht; wenn der Widerstand z. B. 16 beträgt, so geht die Linie durch einen Punkt, für den die Ordinate 16 Volt und die Abscisse 1 Ampere darstellt. Diese Linie treffe in M die Magnetisierungscurve. Nehmen wir irgend einen Punkt P der Curve, so entspricht die Ordinate PR je nach unserer Wahl entweder dem wirksamen Magnetismus, falls der magnetisirende Strom OR ist, oder der gesamten Spannung, welche im Anker inducirt wird; der Theil QR der Ordinate entspricht der Klemmenspannung e . PQ stellt dann $E - e$, d. h. den Spannungsverlust im Anker $r_a i_a$ dar. Ziehen wir rechts von O die Linie OJ unter einem Winkel, dessen Tangente dem Anker-

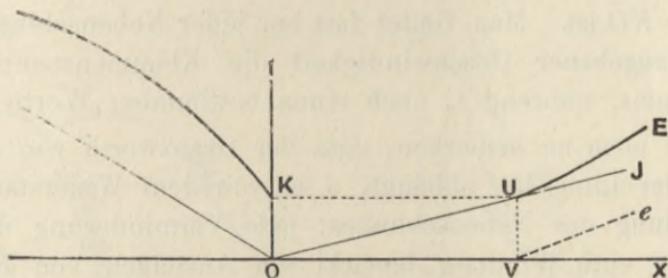


Fig. 146.

widerstand r_a entspricht, und legen die Senkrechte VU so weit von O , dass $VU = PQ$ wird, so entspricht OV dem Werthe i_a . Am bequemsten wird die Construction, wenn man von den Punkten P und Q auf die Ordinatenachse Senkrechte fällt; durch den Punkt e zieht man eine Parallele zu OU , welche die Verlängerung von EP in T trifft; fällt man von T auf OX eine Senkrechte, so erhält man die Punkte t , U und V ; Tt ist gleich UV . T ist ein Punkt der Curve für E und i_a , t für e und i_a . Aus der letzteren Curve erhält man die äussere Charakteristik nach der Erläuterung auf Seite 200. Der untere gegen O sich wendende Theil der hyperbolischen Curven entspricht dem veränderlichen Zustande im unteren Theile der magnetischen Curve.

Aus dem Vorhandensein eines dem Maximalwerth von i_a entsprechenden Theiles, wo die Curve sich an der äussersten Stelle rechts wendet, darf man nicht schliessen, dass die Maschine diesen Maximalstrom liefern kann; der von der Maschine sicher zu liefernde stärkste Strom hängt von dem Querschnitt der Ankerleiter

ab; die letzteren sind indessen auch in den besten Maschinen nicht dazu bestimmt, unter solchen Bedingungen einen Strom zu leiten. Der dem Betrieb entsprechende Curventheil ist gewöhnlich der obere (vergl. Fig. 145). Aus der Construction erhellt, dass sich die Curve um so weiter nach rechts hin erstreckt und desto gerader die oberen Theile der Curven werden, je geringer der innere Widerstand ist; eine gute Nebenschlussmaschine mit geringem inneren Widerstande wird für Gleichspannung beinahe selbstregelnd sein.

Ist keine anfängliche Magnetisirung oder kein magnetischer Rückstand vorhanden, so gehen beide Curven durch den Punkt O , andernfalls findet dies nicht statt. Es beginnt die Magnetisierungscurve dann oberhalb O , etwa im Punkte K (Fig. 146); die unteren Theile der Curven für E und e enden in Punkten, die so liegen, dass $UV = KO$ ist. Man findet fast bei jeder Nebenschlussmaschine, dass bei gegebener Geschwindigkeit die Klemmenspannung e bis Null abnimmt, während i_a noch einen bestimmten Werth besitzt.

Es ist noch zu bemerken, dass der Grenzwert von E von der Neigung der Linie MO abhängt, d. h. von dem Widerstande für je eine Windung des Nebenschlusses; jede Verminderung des Widerstandes für eine Windung bewirkt ein Ansteigen von E dadurch, dass ein höherer Grad der Magnetisirung bei einem gegebenen Werthe von e erzielt wird.

Unterschiede im Verhalten der Reihen- und der Nebenschlussmaschine.

Der Unterschied im Verhalten der beiden Maschinenarten, wenn der Widerstand des Stromkreises ab- oder zunimmt, ist bereits auf Seite 198 erwähnt worden. Bei der elektrischen Beleuchtung werden Maschinen in der Regel benutzt, um entweder:

- a) Nebeneinander geschaltete Glühlampen zu speisen; dann muss eine gleichbleibende Klemmenspannung aufrecht erhalten werden; oder
- b) hintereinander geschaltete Bogenlampen zu speisen; dann muss die Maschine einen Strom von gleichbleibender Stärke liefern.

Im Falle der Gleichspannung ändert sich die Stromstärke mit der Zahl der nebeneinander geschalteten Lampen, während bei gleichbleibender Stromstärke die elektromotorische Kraft mit der Zahl der hintereinander geschalteten Lampen sich ändert. Zur Erläuterung der Verwendbarkeit von Reihen- oder Nebenschluss-

maschinen für solche Aufgaben stellt man zweckmässig aus Versuchen oder aus der Theorie abgeleitete vergleichende Curven her. Bei der Nebeneinanderschaltung wird durch Hinzufügung jeder Lampe die Leitungsfähigkeit des Stromkreises um einen gleichen Betrag (= dem reciproken Werthe des Widerstandes einer Lampe) erhöht. Es wird deshalb zweckmässig die Beziehung zwischen e und $\frac{1}{R}$ als Curve dargestellt, wie dies aus der Fig. 147 ersichtlich ist. Jede der beiden Maschinen hat das gleiche Maximum der Klemmenspannung. Man sieht, dass bei beiden Maschinen der Werth von e sich nicht gleich bleibt, wenn die Zahl der Lampen ($\frac{1}{R}$) vergrössert wird. Die Nebenschlussmaschine liefert die besser gleichbleibende Spannung, welche aber bei Vermehrung der Lampen doch abfällt.

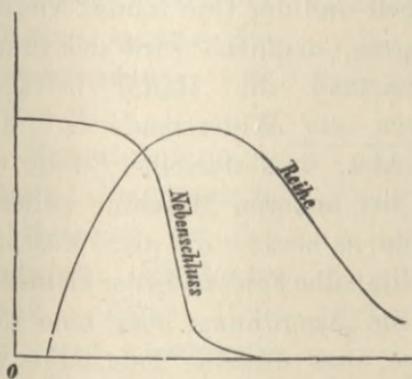


Fig. 147.

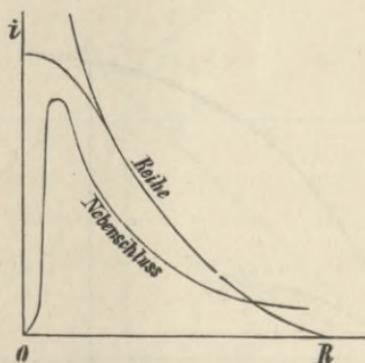


Fig. 148.

Schaltet man Lampen in einem einzelnen Stromkreise hintereinander, so vermehrt jede Lampe den Widerstand des Kreises, und es ist daher dienlich, die Beziehung zwischen i und R darzustellen.

Die Fig. 148 zeigt das Ergebniss. Man sieht, dass keine von beiden Maschinen eine gleichbleibende Stromstärke liefert; für die Nebenschlussmaschine giebt es nur einen kleinen Bereich, in dem der Werth der Stromstärke sich eher gleichbleibend zeigt, als dies bei der Reihenmaschine irgend der Fall ist; dieser Bereich liegt beim Maximum der Stromstärke. Der punktirte Theil der Curve bezieht sich auf eine Reihenmaschine mit einer abfallenden Charakteristik (wie in der Fig. 131), die mit mässig kleinen Widerständen eine einigermaßen gleichbleibende Stromstärke liefert. Es ist indessen offenbar, dass eine andere als einfache Reihen- oder einfache Nebenschlussmaschine dazu gehört, um für irgend einen Zweck als selbstregelnde Maschine zu dienen.

Weitere Anwendungen der Charakteristik.

Die nachfolgenden Beispiele der weiteren Benutzung der Charakteristik sind der Abhandlung von Hopkinson in den »Proc. Inst. Mech. Engineers« für April 1880 entnommen worden.

Beziehung zwischen Charakteristik und Grösse der Maschine.

Es möge eine bestimmte Maschine die durch die Curve Oa in der Fig. 149 dargestellte Charakteristik besitzen. Es fragt sich, wie die Charakteristik einer Maschine derselben Form, aber mit doppelten linearen Abmessungen, beschaffen sein wird. Die Oberflächen werden vervierfacht, die Masse und das Gewicht wird achtfach sein. Die Anzahl der Drahtwindungen ist dieselbe, wie früher, die Länge aber doppelt und der Querschnitt viermal so gross, demnach wird der innere Widerstand die Hälfte betragen. Wären die Widerstände so eingerichtet, dass derselbe Strom wie von der anderen Maschine geliefert würde, so besässe die neue Maschine nur die halbe Feldstärke der kleineren. Ist die Anordnung aber eine derartige, dass dieselbe Feldstärke wie vorher erzielt wird, so wird die Stromstärke verdoppelt.

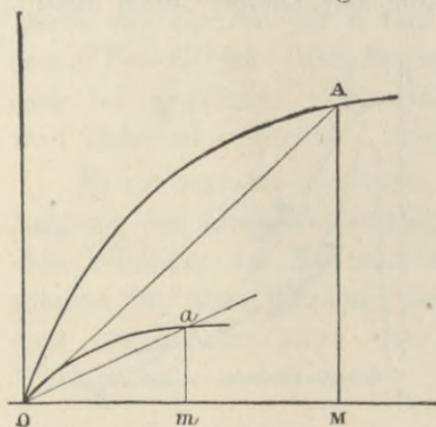


Fig. 149.

Wenn nun die Fläche der umlaufenden Wicklungen auf das Vierfache gewachsen ist, so werden viermal so viel Kraftlinien (bei derselben Geschwindigkeit) geschnitten und die elektromotorische Kraft wird viermal so gross sein. Wir bedürfen aber nur eines doppelt so starken Stromes. Das heisst also, dass der Widerstand verdoppelt werden muss, wenn das Feld dieselbe Stärke besitzt. Man ziehe vom Punkte a der Charakteristik der kleineren Maschine die Ordinate am , mache $mM = Om$ und errichte in M eine Senkrechte MA , gleich der vierfachen Länge von am . Dann geht die neue Charakteristik durch den Punkt A . Der Widerstand — die Neigung von OA — wird doppelt so gross als Oa sein. Die Punkte a und A sind bezüglich der Sättigung des Eisens der Magnete gleiche Punkte; dies bestimmt die praktischen Grenzen für die wirtschaftliche Leistung einer Maschine gegebenen Musters bei gegebener Geschwindigkeit. Wir ersehen demnach, dass mit der vierfachen

elektromotorischen Kraft und doppelter Stromstärke, die in der Secunde entwickelte elektrische Energie achtmal so gross als bei der kleineren Maschine ist, wenn diese bei gleicher Sättigungsgrenze arbeitet. Man möge dies mit der Erläuterung der Beziehung zwischen der Grösse und dem Wirkungsgrade (Seite 102) vergleichen.

Anwendung der Charakteristik auf Maschinen, welche zum Laden von Sammlerbatterien benutzt werden.

Die Lösung nachstehender Aufgabe besitzt eine gewisse praktische Bedeutung: Es werde eine Maschine bei gegebener Geschwindigkeit zum Laden einer Sammlerbatterie benutzt; welche Stromstärke wird geliefert?

Hopkinson hat die Lösung für den Fall gegeben, dass eine Reihenmaschine verwendet wird.

Man zeichne die gesammte Charakteristik der Maschine bei der gegebenen Geschwindigkeit (Figur 150). Von OY schneide man das die elektro-

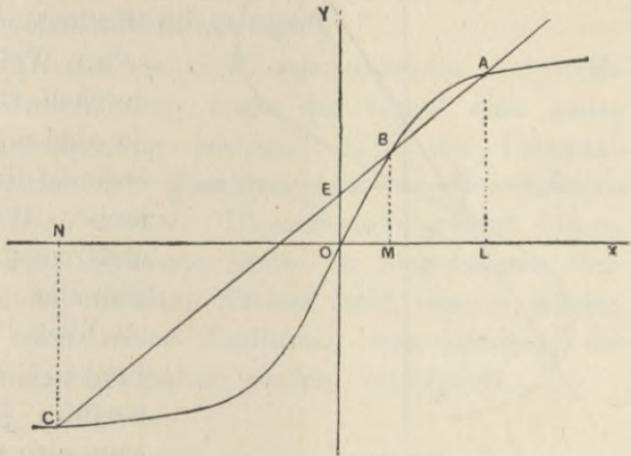


Fig. 150.

motorische Kraft der Sammler darstellende Stück OE ab; durch den Punkt E lege man die Linie CEA unter einem solchen Winkel mit der Abscissenachse, dass dessen Tangente den gesammten Widerstand des Stromkreises einschliesslich des Widerstandes der Sammler ausdrückt. Die Linie schneidet die Charakteristik in den Punkten B und A . Wird die Charakteristik im dritten Quadranten wiederholt, so erhält man auch den Schnittpunkt C . Der negative Theil (OC) bedeutet die Charakteristik, wenn der Strom in der Maschine sich umkehrt, die elektromotorische Kraft demnach ebenfalls in umgekehrter Richtung wirkt. OL stellt die wirkliche Stromstärke im Kreise dar, OM einen unbeständigen Strom, der für einen Augenblick bestehen könnte, ON den Strom, welcher im Kreise herrschen würde, falls die Sammler durch ihre Gegenwirkung den Strom der Maschine umkehren, wie solches thatsächlich bei Verwendung von Reihenmaschinen oftmals eintritt. Denn wenn die Sammlerbatterie ihre volle Ladung erreicht und die elektromotorische

Kraft ansteigt, oder der Widerstand des Stromkreises infolge der Erwärmung sich erhöht, so muss man beachten, dass die wirksame elektromotorische Kraft AL und die Stromstärke OL unvermeidlich sich vermindern, der Magnetismus der Feldmagnete demnach abfällt und infolge dessen der Punkt A näher zu der unbeständigen Stelle in der Biegung der Curve heranrückt.

Bei der Nebenschlussmaschine liegt die Sache anders. Es möge die Fig. 151 die Charakteristik der Nebenschlussmaschine darstellen; der Strom im äusseren Kreise sei nach ox aufgetragen, die gesammte elektromotorische Kraft nach oy . Man lege die Linie CEA in derselben Weise wie vorher erwähnt, durch die Curve. Die Linie schneidet den positiven Theil in A , OL bedeutet die Stromstärke im Hauptkreise. Wenn nun entweder die elektromotorische Gegenkraft der Sammler oder der Widerstand im Kreise ansteigt, so rückt der Punkt A höher auf der Curve hinauf. Der Ladungsstrom OL kann sich vermindern, der Strom im Nebenschluss wird steigen, weil

die wirksame elektromotorische Kraft AL anwächst. Deshalb wird bei Verwendung einer Nebenschlussmaschine zum Laden einer Sammlerbatterie die Letztere jedenfalls nicht die ladende Maschine überwältigen und eine Umkehrung herbeiführen.

Für eine Reihenmaschine, welche eine Bogenlampe speist, kann Fig. 150 auch die bisweilen beobachtete Unbeständigkeit erklären. Der Flammenbogen wirkt wie eine elektromotorische Gegenkraft, welche bei stetigem Bogen nicht unter 35 Volt beträgt. Wenn daher OE gleich diesem Werth gesetzt wird, muss der übrige Widerstand des Stromkreises niedrig genug sein, dass die schräge Linie EA die Curve noch oberhalb des Knies schneidet, andernfalls tritt die Unbeständigkeit ein.

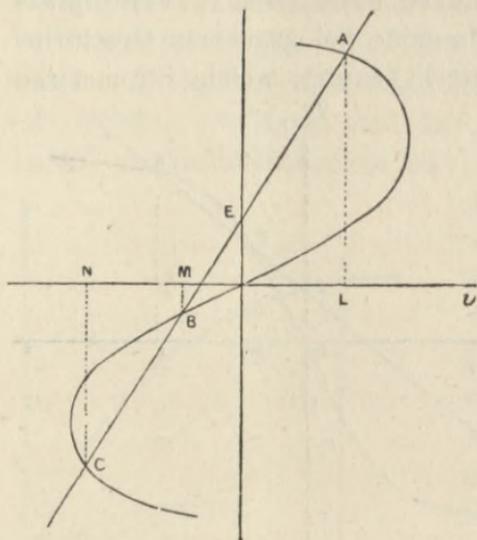


Fig. 151.

Kapitel XI.

Maschinen für Gleichspannung.

Betriebsbedingungen.

Für verschiedene Zwecke, so z. B. zum Betriebe von Glühlampen in Nebeneinanderschaltung, muss der Strom eine genau gleichbleibende Klemmenspannung besitzen, d. h. die Potentialdifferenz an den Klemmen der Maschine oder an den Lampen muss gleichbleibend erhalten werden. Diese Forderung setzt voraus, dass der von der Maschine gelieferte Strom im umgekehrten Verhältniss zum Widerstand des äusseren Kreises steht, dass er wächst, wenn der Widerstand sich durch Einfügung von Lampen, die zwischen die Hauptleitungen geschaltet werden, vermindert.

Aus zwei Ursachen, und zwar

1. dem inneren Widerstand,
2. den entmagnetisirenden Gegenwirkungen des Ankers

weicht die Spannung an den Klemmen bei voller Belastung von dem Werthe ab, den sie (bei derselben Geschwindigkeit und Magnetisirung) ohne Belastung besitzen würde. Der Spannungsverlust steigt mit der Belastung. Wenn daher die Stromlieferung bei gleichbleibender Spannung erfolgen soll, muss ein Ausgleich für den Spannungsverlust herbeigeführt werden. Soll eine Maschine Lampen für 100 Volt Spannung betreiben, so darf bei Einschaltung sämtlicher Lampen die Spannung nicht auf 97 oder 96 Volt herabsinken.

Sollen dagegen hintereinander geschaltete Bogenlampen oder Triebmaschinen betrieben werden, so wird es nothwendig, die Stromstärke gleichbleibend zu erhalten, ohne Rücksicht darauf, wie viele oder wie wenige Lampen oder Triebmaschinen in Thätigkeit sich befinden.

Wenn der Widerstand des Hauptkreises durch Zuschaltung von Lampen steigt, so wird dadurch ein verhältnissmässiges Anwachsen der elektromotorischen Kraft der Maschine erforderlich.

Die beiden Ziele der Regelung von Maschinen sind daher nicht allein verschieden, sondern auch unvereinbar miteinander; eine Maschine vermag nicht ihre elektromotorische Kraft gleich zu erhalten und zu derselben Zeit sie im Verhältniss zum veränderlichen Widerstand des äusseren Kreises zu ändern. Die beiden Systeme muss man vollständig auseinander halten, da sie ganz verschiedenen Fällen der elektrischen Vertheilung sich anpassen. Sowohl ihre Theorie als auch die praktischen Arten ihrer Ausführung sind verschieden.

Maschinen für gleichbleibende Stromstärke, wie solche für Bogenlicht und für besondere Glühlampen zur Hintereinanderschaltung erforderlich sind, werden im Kapitel XVIII beschrieben. Im vorliegenden Kapitel werden nur Maschinen für Gleichspannung behandelt.

Es giebt verschiedene Wege, um die Thätigkeit von Dynamomaschinen so zu regeln, dass entweder gleiche Spannung oder gleiche Stromstärke aufrecht erhalten wird. Einige Methoden setzen eine Regelung mit der Hand voraus, einige gründen sich auf selbstthätige Ein- und Ausschaltung von Widerständen, um die Erregung der Feldmagnete zu verändern, andere benutzen die selbstthätige Einstellung der Bürsten, wieder andere regeln auf elektrischem Wege die Geschwindigkeit. Letztere Methode wird in dem Kapitel über Regeler näher behandelt. Vor allem möge bemerkt werden, dass die Spannung in einer gegebenen Maschine, wie durch die Grundgleichung (S. 159) nachgewiesen worden ist, von drei Grössen abhängt: der Geschwindigkeit, der Zahl der Ankerwindungen und der magnetischen Strömung; jede dieser Grössen kann zur Regelung der Leistung benutzt werden. Die Geschwindigkeit lässt sich durch rein mechanische Mittel ändern; die Zahl der wirksamen Ankerwindungen kann man durch Vorwärtsschiebung der Bürsten über den neutralen Punkt hinaus ändern; die magnetische Strömung ist durch Aenderung der zur Erregung des Magnetismus dienenden magnetisirenden Kraft oder durch Aenderung der Anordnung des magnetischen Kreises zu regeln. Diese Mittel sind sämmtlich zur Regelung von Dynamomaschinen benutzt worden.

Bei vereinzeltten Anlagen kann es passend erscheinen, einen Regeler zur Veränderung der Geschwindigkeit der Dampfmaschine zu benutzen, um im Stromkreise gleichbleibende Spannung herbeizuführen; dieses Mittel reicht indessen nicht aus, sobald die Maschine mehr zu leisten hat, als nur eine einzelne Dynamomaschine zu bewegen. Es sind aus diesem Grunde Methoden vorgezogen worden,

welche die Aufrechterhaltung einer gleichbleibenden Triebgeschwindigkeit gestatten. Im vorliegenden Kapitel wird letztere Bedingung durchweg vorausgesetzt; da ferner eine rein magnetische Regelungsmethode nur wenig benutzt wird, so haben wir uns nur mit solchen Methoden zu befassen, die auf der Aenderung der magnetisirenden Kräfte beruhen. Nach einigen dieser Methoden erfolgt die Regelung mit der Hand, nach anderen selbstthätig.

Der Handregeler von Edison.

Bei der Einrichtung von Edison zur Aufrechthaltung der Gleichspannung im Hauptstromkreise wird eine Nebenschlussmaschine verwendet, in deren Zweigkreis ein veränderlicher Widerstand R eingeschaltet wird (Fig. 152).

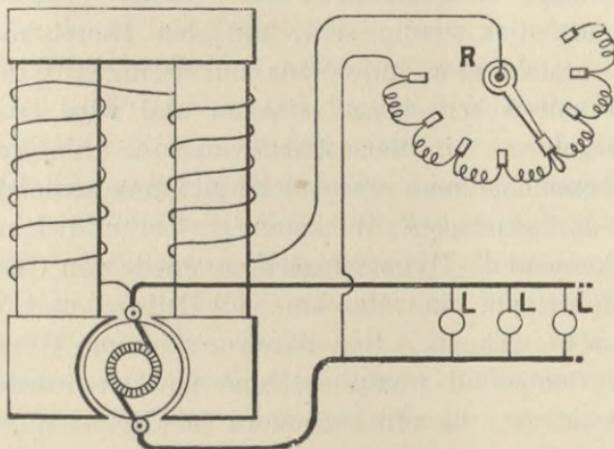


Fig. 152. Edison's Regelung.

Ein mit der Hand zu bewogender Hebel kann über eine Anzahl Knöpfe, die mit einem Satze von Widerständen in Verbindung stehen, verschoben werden. Sobald die Spannung steigt oder unter den richtigen Betrag fällt, wird der Grad der Erregung der Feldmagnete durch Verschieben des Hebels geregelt.

Um die Einrichtung vollkommen zu gestalten, müsste der Widerstand selbstthätig durch einen Elektromagnet, dessen Spulen in einem unabhängigen Nebenschlusse zum Hauptkreise liegen, richtig gestellt werden. Edison hat auch einen solchen Kunstgriff verwendet. Wie Seite 199 gezeigt worden ist, wird in einer gut gebauten Nebenschlussmaschine die Spannung nahezu gleichbleibend erhalten, bei voller Belastung fällt die Klemmenspannung sehr wenig ab. Eine geringe Zunahme der erregenden Kraft ist zur Ausgleichung des

Spannungsverlustes bei voller Belastung in einer solchen Maschine erforderlich. Der Regelungswiderstand lässt sich bei einer besonders erregten Maschine in gleicher Weise verwenden.

Dynamomaschinen mit Selbstregelung.

Die Theorie der selbstregelnden Maschinen ist sehr einfach. Die Spannung hängt ab von der Magnetisirung; jeder Spannungsabfall kann also durch Vermehrung der Kraftlinienmenge ausgeglichen werden. Die Frage ist demnach die: Wie kann man das Anwachsen des Stromes im Hauptkreise, das den Spannungsabfall veranlasst, zur Vermehrung der Menge der Kraftlinien benutzen? Es ist klar, dass hierzu eine Hauptkreiswicklung, welche genügend Windungen hat, um die hinzuzufügende Induction hervorzubringen, auf die Feldmagnete gebracht werden muss. Diese Ausgleichswicklung muss dick genug sein, um den Hauptstrom leiten zu können und besteht gewöhnlich aus nur wenigen Windungen. Ist die Maschine mit Nebenschluss versehen und wird ausserdem eine Ausgleichswicklung mit der Ankerwicklung hintereinander geschaltet, so bezeichnet man eine solche zusammengesetzte Wicklung gewöhnlich als »gemischte Wicklung« (Verbundwicklung). Der Ausdruck »Compound«-Dynamomaschine wurde von Crompton und Kapp eingeführt, um eine Maschine mit Reihen- und Nebenschlusswicklung zu bezeichnen. Der Ausdruck ist im Hinblick auf die Bezeichnung Compound-Dampfmaschine gewählt worden, der eine Maschine bezeichnet, die mit Cylindern für Hoch- und Niederdruck versehen ist. Ebenso gut lässt sich eine ausgleichende Reihenwicklung bei jeder gut entworfenen Gleichstrommaschine verwenden, in der der anfängliche Magnetismus unabhängig oder gleichbleibend erregt wird. Folgende Schaltungsarten sind überhaupt möglich:

1. Regelnde Reihenwicklungen + Dauermagnete zur anfänglichen Erregung des Feldes durch eine unabhängige gleichbleibende Magnetisirung.
2. Regelnde Reihenwicklungen + ein unabhängiger, in gesonderten Wicklungen um den Feldmagnet kreisender Strom, um eine unabhängige gleichbleibende Magnetisirung herbeizuführen.
3. Regelnde Reihenwicklungen + ein unabhängiger, im Hauptkreise vorhandener Strom (entweder mittels einer Batterie oder einer besonderen Magneto-Dynamomaschine zu erzeugen), der die Feldmagnete durch eine unabhängige gleichbleibende Magnetisirung theilweise erregt.

4. Regelnde Reihenwickelungen + Nebenschlusswickelungen, die einen Theil des Maschinenstromes erhalten und dadurch die Feldmagnete mit einer unabhängigen und fast gleichbleibenden Magnetisirung erregen, zu der die Magnetisirung durch die Reihenwicklung hinzutritt.
5. Für Wechselstrommaschinen können Wickelungen in Reihe mit dem Hauptkreise nicht verwendet werden, aber man kann die regelnden Wickelungen mit Strömen speisen, welche man aus dem Hauptkreise ableitet (mittels eines passenden Umsetzungsapparates) und dann durch einen Stromwender richtet. Die unabhängige Magnetisirung lässt sich entweder durch eine Hilfsmaschine herbeiführen, oder durch eine besondere Wickelung oder eine Gruppe von Wickelungen auf dem Anker oder durch einen anderen Umsetzungsapparat, dessen primäre Spule zum Hauptkreise als Nebenschluss liegt; in jedem der letzteren Fälle werden die Ströme besonders gerichtet.

Theoretisch sind noch verschiedene andere Methoden der Selbstregelung möglich: z. B. eine Maschine mit einem langen Anker, der zwischen zwei getrennten Feldmagneten umläuft; der eine wird unabhängig erregt, der andere wird in Reihe geschaltet; eine Reihenmaschine mit ungesättigten Magneten, in Verbindung mit einer (gleichsam unabhängigen) Reihenmaschine mit übersättigten Magneten auf derselben Welle; eine Reihenmaschine mit zwei Sätzen von Feldmagnetpolen; ein Polsatz dient als in Reihe erregter Satz, der zweite als unabhängig oder im Nebenschlusse erregter u. s. w.

Theorie der Selbstregelung.

Bei der Betrachtung der Theorie der Selbstregelung gehen wir in folgender Weise vor: Zunächst ermitteln wir einen Ausdruck für die Klemmenspannung. Dieser wird im Allgemeinen aus drei Gliedern zusammengesetzt sein. Wir untersuchen die drei Glieder, ob ihre Factoren constant oder veränderlich sind. Nachdem bestimmt worden ist, welche Glieder veränderliche Factoren enthalten, wird zu erörtern sein, unter welchen Bedingungen (etwa dadurch, dass eine besondere Geschwindigkeit oder eine besondere Windungszahl vorgeschrieben wird) diejenigen Glieder, die veränderliche Factoren enthalten, verschwinden. Die Bedingungen werden in einer zu untersuchenden Bedingungsgleichung zusammengefasst. Im Allgemeinen wird man finden, dass bei vorgeschriebener Geschwindigkeit eine besondere oder »kritische« Zahl der regelnden Wickelungen sich ableiten lässt;

wird anderseits die Zahl der regelnden Wickelungen von vornherein als bestimmt angenommen, so lässt sich eine gewisse »kritische« Geschwindigkeit ableiten, bei der die Selbstregelung erfolgt.

Sowohl die algebraische als geometrische Behandlung der Theorie ist anwendbar. Beide Arten finden hier Verwendung.

Fall 1. Regelnde Reihenwickelungen + Dauermagnete
(vergl. S. 53).

Sind die Feldmagnete zum Theil dauernd magnetisirt, oder werden stählerne Dauermagnete ausser den Elektromagneten verwendet, so dass ein dauerndes Feld entsteht, das vom Strome nicht abhängt, so können wir die Menge der magnetischen Linien im unabhängigen Felde mit \mathfrak{S}_1 bezeichnen.

Die Grundgleichung der Reihenmaschine ist für die elektromotorische Kraft (S. 44):

$$E = n N \mathfrak{S}$$

und die Klemmenspannung

$$e = E - i(r_a + r_m).$$

Die Menge \mathfrak{S} der in jedem Augenblicke durch den Anker tretenden Kraftlinien setzt sich aus zwei Theilen zusammen, der dauernd vorhandenen unabhängigen Menge \mathfrak{S}_1 und der vom Strom i abhängenden Menge, die ausgedrückt wird durch

$$\frac{4\pi S i / 10}{\sum \frac{l}{\mu A}},$$

wenn S die Zahl der Windungen der regelnden Wickelung, l die Länge des magnetischen Kreises, A dessen Querschnitt und μ den Durchschnittswerth der Durchlässigkeit zwischen den Grenzen $i = 0$ und $i = \text{Maximum}$ bedeutet. Zur Abkürzung setzen wir:

$$\frac{4\pi}{10} \sum \frac{l}{\mu A} = q$$

und können nun den veränderlichen Theil von \mathfrak{S} mit

$$q S i$$

bezeichnen; folglich wird

$$\mathfrak{S} = \mathfrak{S}_1 + q S i.$$

Für e erhält man:

$$e = n N (\mathfrak{S}_1 + q S i) - i(r_a + r_m)$$

oder
$$e = n N \mathfrak{S}_1 + n N q S i - i(r_a + r_m).$$

Die rechte Seite der Gleichung besteht aus drei Gliedern, deren erstes die Geschwindigkeit und zwei Constanten enthält. Die beiden anderen Glieder enthalten eine veränderliche Grösse — die Strom-

stärke —, eines enthält gleichfalls die Geschwindigkeit n und die Wickelungszahl S . Ist S von vornherein bestimmt, so muss offenbar die Geschwindigkeit, bei der die Maschine selbstregelnd wird, diejenige sein, bei der der Ausdruck für e nur Constanten enthält. Ist n vorgeschrieben, so muss S derartig geändert werden, dass die Glieder mit einem veränderlichen Factor ausfallen. Da die beiden letzten Glieder eine Differenz bilden, so kann man durch Aenderung von n oder von S den Werth $n N q S$ gleich $r_a + r_m$ machen.

Bei der gleichbleibenden Geschwindigkeit, welche wir n_1 nennen, wird demnach

$$n_1 N q S i - i(r_a + r_m) = 0,$$

d. h. N und n_1 müssen so beschaffen sein, dass

$$n_1 N q S = r_a + r_m \quad \dots \dots \dots \text{(XIII)}$$

Dies ist die Bedingungsgleichung.

Wird die darin enthaltene Bedingung erfüllt, so fallen die beiden letzten Glieder im Werthe für e aus, und wir erhalten

$$e = n_1 N \mathfrak{S}_1 = a \text{ (constant).}$$

Nachdem hiermit bewiesen ist, dass bei der gegebenen Geschwindigkeit e constant wird, ist die Untersuchung von Bedeutung, wodurch der Werth von e denn bestimmt wird. Offenbar ist e proportional \mathfrak{S}_1 , dem unabhängigen Dauermagnetismus des Feldes. Wir können deshalb eine solche Anordnung treffen, dass die mit derselben Geschwindigkeit getriebene Maschine eine andere Spannung liefert, wenn wir nur \mathfrak{S}_1 in dem erforderlichen Verhältnisse ändern.

Nehmen wir andererseits mit Rücksicht auf mechanische Umstände die Geschwindigkeit als vorherbestimmt an, so wird die kritische Zahl der regelnden Windungen der Wickelung ausgedrückt durch:

$$S = \frac{r_a + r_m}{n N q} \quad \dots \dots \dots \text{(XIV).}$$

Je höher also der innere Widerstand der Maschine ist, desto grösser muss auch die Zahl der regelnden Reihenwickelungen werden, wenn Selbstregelung eintreten soll.

Aus der Gleichung (XIII)

$$n_1 N q S = r_a + r_m$$

ergibt sich für die kritische Geschwindigkeit

$$n_1 = \frac{r_a + r_m}{S} \cdot \frac{1}{N q}.$$

Dies zeigt, dass bei gegebener Reihenwickelung eine bestimmte kritische Geschwindigkeit für die Selbstregelung besteht und dass

diese mit dem innern Widerstand zunimmt. Endlich können wir die Gleichung folgendermassen deuten:

$$\text{Kritische Geschwindigkeit} = \frac{\text{Gesamter innerer Widerstand}}{\text{Windungszahl der Magnetwicklung}} \cdot p.$$

Der Werth p ist eine Grösse, die nur von der Ankerwicklung und vom magnetischen Kreise bzw. der wirksamen Durchlässigkeit desselben innerhalb des Bereiches, für den die Regelung gefordert wird, abhängig ist.

Wir hatten bis jetzt angenommen, dass die einzige Ursache des auszugleichenden Spannungsabfalles vom innern Widerstand herrühre. Der durch die entmagnetisirende Wirkung des Ankers verursachte Abfall der Spannung hat bei neueren Maschinen eine ebenso grosse Bedeutung. Es ist zu bedenken, dass bei einem Verschiebungswinkel λ der entmagnetisirende Gürtel $N\lambda/180$ Leiter in einem Winkel von 2λ umfasst. Da jeder dieser Leiter $\frac{1}{2}i$ A leitet, so betragen die entmagnetisirenden Ampere-Windungen $N\lambda i/180$. Nennt man die Zahl der Leiter innerhalb des Winkels D , so betragen die entmagnetisirenden Ampere-Windungen $2D\frac{1}{2}i = Di$. Da nun die Windungen auf dem Anker liegen, während die ausgleichenden Wickelungen sich auf dem Feldmagnet befinden, so wird ihre Wirkung in annäherndem Verhältniss zum Zerstreungscoefficienten v (vergl. S. 139) grösser sein. Die Reihenwickelungen S sind deshalb um den Werth Dv zu vermehren, so dass

$$S = \frac{r_a + r_m}{n_1 N q} + Dv \dots \dots \dots \text{(XV).}$$

Fall 2. Reihenmaschine + Besondere erregende Wickelungen

(vergl. Fig. 44).

Es ist ein unabhängiger Magnetismus vorhanden, der von einem in besonderen Wickelungen um den Feldmagnet kreisenden Strom herrührt und einen Theil des Feldmagnetismus liefert. Nennen wir die Zahl der magnetischen Linien, die der unabhängigen Erregung entstammen, \mathfrak{S}_1 , so trifft der vorige Beweis zu, und es gelten die gleichen Schlussfolgerungen. \mathfrak{S}_1 wird indessen keine wirkliche Constante sein, weil die Wirkung der gleichbleibenden magnetisirenden Kraft mit dem Sättigungsgrade, der aus der gesammten magnetisirenden Kraft entspringt, sich ändert. Wird aber die durchschnittliche wirksame Durchlässigkeit im Bereich der Regelung bei der Berechnung von \mathfrak{S}_1 und N in Betracht gezogen, so ist damit einem Abfall in der Wirkung des unabhängigen erregenden Stromes vorgebeugt.

Geometrische Darstellung der Fälle 1 und 2.

Auf Seite 173 wurde gezeigt, wie die Potentialwerthe an den Klemmen bei Magnetomaschinen beim Ansteigen des Stromes abnehmen und dass e stets um den Betrag $r_a i$ kleiner ist als E .

Es seien OX und OP (Fig. 153) die Coordinatenachsen, OP stelle die elektromotorische Kraft ($E = n_1 N \mathfrak{S}_1$) dar, die von dem dauernden oder unabhängigen Magnetismus herrührt, der bei stromlosem Anker bestimmt wird. Unter der Annahme, dass die Gegenwirkungen des Ankers wegen ihrer Geringfügigkeit vernachlässigt werden können, wird E bei gleichbleibender Geschwindigkeit auch bei jeder Stromstärke gleich bleiben, e wird jedoch sinken. Von O aus zieht man die Linie OJ unter einem Winkel, dessen Tangente den inneren Widerstand der Maschine darstellt. Betrachten wir jetzt den Fall, in dem die Stromstärke i dem Werthe OV entspricht. UV bedeutet

den Spannungsverlust im Anker, denn $UV = OV \cdot \text{tg } UOV = r_a i$. Von t aus werde das Stück $tQ = UV$ abgeschnitten, so stellt QV die Grösse von e dar. Während die Curve für die Beziehung zwischen E und i eine fast horizontale Linie bildet,

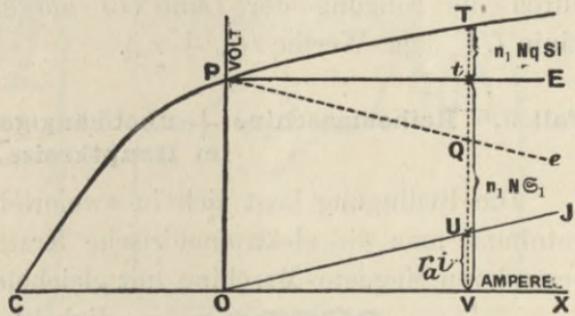


Fig. 153.

fällt die Curve für e und i (äussere Charakteristik) ab, wie die punktirte Linie zeigt. Man kann jeden Punkt der Curve für e aus der Curve für E einfach dadurch bestimmen, dass man von der Ordinate ein Stück abschneidet, das dem Abstände zwischen JO und OX an der entsprechenden Stelle gleich ist. Demnach ist es einleuchtend, dass bei dem horizontalen Verlauf der Curve E die Curve e sich abwärts neigen muss, und dass wir eine ansteigende Curve für E haben müssten, deren Punkte genau um den vorhin genannten jedesmaligen Betrag höher liegen, falls wir eine horizontale Curve für e , d. h. gleichbleibende Spannung, gebrauchen. Bei gegebener Geschwindigkeit n_1 hat nun E den Werth $n_1 N \mathfrak{S}_1$, wenn \mathfrak{S}_1 bedeutet, dass der magnetische Kreis (entweder dauernd oder durch einen besonderen Strom) in einem solchen Grade erregt wurde, dass \mathfrak{S}_1 Linien durch den Anker treten.

In derselben Weise, wie die Zahl der Volt aufgetragen wurde, sind auch die Werthe von \mathfrak{S} nach einem entsprechenden Maassstabe

zu zeichnen; OP kann den Werth \mathfrak{S}_1 darstellen. P ist deshalb ein Punkt der Magnetisirungscurve, die ansteigt, sobald wir eine grössere Zahl von Ampere-Windungen anwenden. Dazu haben wir eine Reihenwicklung auf dem Magnete nothwendig, und zwar so viele Windungen S , dass die Ampere-Windungen Si das Ansteigen des Magnetismus im richtigen Verhältniss herbeiführen, so dass $tT=UV$ wird. Wir gewinnen dann eine ansteigende Curve für E nicht als gerade Linie, indessen von solcher Eigenschaft, dass nach Abzug der Anzahl Volt, die im Anker verbraucht werden, eine fast horizontal verlaufende Linie für e sich ergibt.

Bei dem Vergleiche der algebraischen mit der geometrischen Methode ersieht man, dass der Werth $n_1 N \mathfrak{S}_1$ der Linie tV , der Werth $n_1 N q Si$ der Linie Tt und der Werth $r_a i$ der Linie UV entspricht. Ist der Widerstand der hinzugefügten Reihenwicklung durch die Neigung der Linie OJ ausgedrückt, so entspricht die Linie UV dem Werthe $t(r_a + r_m)$.

Fall 3. Reihenmaschine + unabhängige elektromotorische Kraft im Hauptkreise.

Die Bedingung lässt sich in zweierlei Weise erfüllen: entweder entnimmt man die elektromotorische Kraft einer Batterie oder einer besonderen Magneto-Maschine mit gleichbleibender Umlaufgeschwindigkeit (Reihen- und Magneto-Maschine, vergl. Seite 53). Der Beweis bleibt derselbe. Die Fig. 154 stellt den Fall dar.

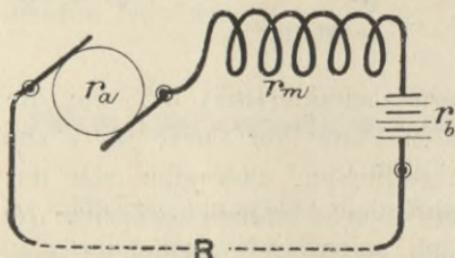


Fig. 154.

Die Lösung ist dieselbe, wie bei den vorhergehenden Fällen, nur sind hier drei innere Widerstände auszugleichen.

Fall 4. Regelnde Reihenwickelungen + Erregende Nebenschlusswickelungen: Gemischte Wickelung.

Die gemischt bewickelte Maschine kann man entweder als eine Reihenmaschine ansehen, der einige Nebenschlusswindungen zur Hervorbringung einer Anfangsmagnetisirung beigegeben sind, oder als eine Nebenschlussmaschine mit einigen Reihenwindungen zur Abgleichung des Abfalles der Klemmenspannung.

Die Schaltung des Nebenschlusses kann auf zwei Arten erfolgen, deren Verhältnisse sich ein wenig unterscheiden. Nach der

Methode des kurzen Nebenschlusses (vergl. S. 54) werden die Nebenschlusswickelungen nur mit dem Ankertheil der Maschine verbunden und laufen von Bürste zu Bürste. Nach der Methode des langen Nebenschlusses werden die Nebenschlusswickelungen an die Klemmen der Maschine gelegt und deshalb entweder als Nebenschluss zum äusseren Kreise oder als Nebenschluss zur Anker- und Reihenwickelung insgesamt betrachtet. Bei der ersten Anordnung ist der Strom im Nebenschlusse nicht gleichbleibend, denn die Spannung ϵ an den Bürsten ist nicht dieselbe wie e ; wenn auch e nahezu gleich bleibt, so trifft dies doch nicht für ϵ zu; dieser Werth nimmt zu, wenn der Widerstand des äusseren Kreises sinkt.

Bei der zweiten Anordnung (langer Nebenschluss) bleibt der Strom im Nebenschlusse gleich, wenn e gleich bleibt, es hat demnach

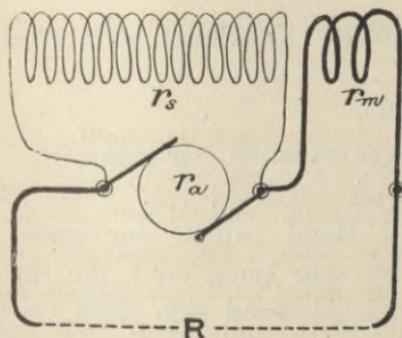


Fig. 155.

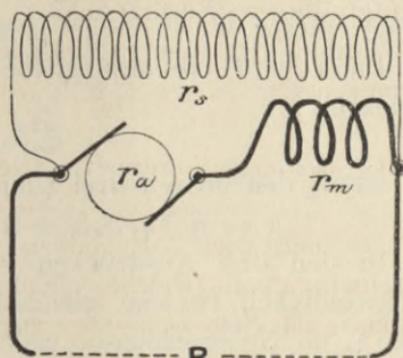


Fig. 156

dieser Fall Aehnlichkeit mit der bereits besprochenen unabhängigen, gleichbleibenden Erregung.

Die erstgenannte Schaltung ist in der Fig. 155 dargestellt. Da in einer gut gebauten Maschine r_a einen sehr geringen Werth besitzt, wird r_m ebenfalls sehr klein sein, weil wenige regelnde Reihenwickelungen erforderlich werden. Ausserdem wird der Strom im Nebenschlusse verhältnissmässig gering werden, weil der Widerstand r_s verhältnissmässig gross ist; es bedingt demnach auch einen sehr geringen Unterschied, ob der Nebenschluss an die beiden Bürsten oder an die Klemmen des Hauptkreises gelegt wird. Die Schaltung mit langem Nebenschlusse ist aus der Fig. 156 ersichtlich.

Die Berechnung für beide Schaltungsarten ist praktisch die gleiche und bedingt dieselbe Beweisführung; für den langen Nebenschluss wird sie etwas einfacher, wie Folgendes zeigt.

Es ist

$$E = n N \mathfrak{S}$$

$$e = E - i_a(r_a + r_m).$$

Da der Magnetismus von der gesammten Zahl der Ampere-Windungen des Feldmagnetes abhängt, erhalten wir

$$\mathfrak{S} = q(S_s i_s + S_h i_a),$$

wenn q dieselbe Bedeutung wie vorhin (Seite 214) besitzt, nämlich

$$q = \frac{4\pi}{10} \frac{l}{\Sigma \mu A}$$

ist, oder noch genauer die veränderliche Zahl bedeutet, die bei verschiedenen Graden der Magnetisirung das numerische Verhältniss zwischen \mathfrak{S} und der gesammten Zahl der Ampere-Windungen des magnetischen Kreises der Maschine darstellt. Für den vorliegenden Zweck wird es erforderlich, den Werth von q für den Fall zu betrachten, dass der Aussenstrom Null wird und die Erregung lediglich dem Nebenschlusse entstammt, also $N_s i_s$ Ampere-Windungen beträgt; dieser Werth möge q_0 sein.

Dann wird die anfängliche Zahl der Kraftlinien bei offenem Stromkreis

$$\mathfrak{S}_0 = q_0 S_s i_s$$

sein. Aus den oberen drei Gleichungen erhalten wir dann:

$$e = n N q_1 S_s i_s + n N q S_h i_a - i_a (r_a + r_m).$$

In den drei Ausdrücken rechter Hand enthält der erste die Geschwindigkeit (welche gleichbleibend sein kann) und die Stromstärke i_s im Nebenschlusse, welche gleichbleibend sein wird, falls e gleichbleibend erhalten werden kann; der zweite Ausdruck enthält ebenfalls die Geschwindigkeit, der zweite und der dritte Ausdruck enthalten endlich beide den veränderlichen Werth i_a . Die beiden veränderlichen Glieder haben entgegengesetztes Vorzeichen. Der Werth e kann aber unmöglich eine Constante werden, wenn die beiden letzten Glieder einen veränderlichen Factor enthalten, es sei denn, dass die Coëfficienten des veränderlichen Factors so beschaffen sind, dass die Ausdrücke sich heben; e kann ferner keine Constante werden, es sei denn, dass entweder die Geschwindigkeit n oder die Windungszahl N , oder beide Werthe, so beschaffen sind, dass diese Bedingung erfüllt wird. Beide Grössen lassen sich entsprechend bemessen, so dass

$$n N q S_h = r_a + r_m$$

wird.

Dies ist eine der beiden Bedingungsgleichungen; ist die Geschwindigkeit gegeben, so wird die kritische Zahl der Reihewindungen:

$$S_h = \frac{r_a + r_m}{n} \cdot \frac{1}{Nq}.$$

Ist S_h gegeben, so wird die kritische Geschwindigkeit

$$n = \frac{r_a + r_m}{S_h} \cdot \frac{1}{Nq}.$$

Wird diese Bedingung erfüllt, so ist e gleichbleibend und besitzt den Werth:

$$e = nNqSi_s.$$

Hierdurch würde indessen der Werth von e nicht bestimmt sein, da $i_s = \frac{e}{r_s}$ ist; wir können aber doch einen bestimmten Werth von e finden, nämlich denjenigen, den e besitzt, wenn die Maschine keinen Strom abgibt, d. h. wenn letztere bei offenem Stromkreise läuft. Es ist dann

$$e = nN\mathfrak{S}_o - i_s(r_a + r_m),$$

oder, da dann q den Werth q_o besitzt,

$$e = nNq_oSi_s.$$

Da aber $e = r_s i_s$, erhalten wir:

$$n = \frac{r_s}{S} \cdot \frac{1}{Nq_o}.$$

Aus diesem und dem vorhin für n entwickelten Werthe ergibt sich:

$$\frac{r_s}{Sq_o} = \frac{r_a + r_m}{S_h q}$$

oder endlich

$$\frac{S}{S_h} = \frac{r_s}{r_a + r_m} \cdot \frac{q}{q_o}$$

als zweite Bedingungsgleichung.

Da q_o proportional μ_o ist, d. h. der magnetischen Durchlässigkeit, wenn kein Strom vorhanden ist, und q der durchschnittlichen Durchlässigkeit μ proportional ist, die im Betriebsbereiche zwischen der Stromlosigkeit und dem Maximalstrom vorhanden ist, so folgt, dass ohne Aenderung der Sättigung $q : q_o = 1$ wäre. In früheren Ausgaben dieses Werkes war die Theorie der gemischten Wicklung ausdrücklich auf die Voraussetzung gegründet, dass keine Sättigung vorhanden, oder mit anderen Worten, dass die Durchlässigkeit gleichbleibend sei. Die erhaltenen Formeln wurden aus diesem Grunde nicht genau. Frölich fand bei einer Maschine von Siemens

$$\frac{S}{S_h} = 17,7,$$

hingegen

$$\frac{r_s + r_a}{r_a + r_m} = 61,9.$$

Hieraus ergibt sich, dass μ_o etwa 3,5 mal so gross hätte sein müssen als μ , mit anderen Worten, die Maschine besass keine

genügende Eisenmasse, sei es im Magnet oder im Ankerkern oder in beiden Theilen. Die Maschine musste schlecht gebaut und von geringem Wirkungsgrade gewesen sein; r_s müsste mindestens 300 mal so gross sein als $r_a + r_m$. Zur Ausgleichung der entmagnetisirenden Wirkung des Ankers sind Zusatzwickelungen zu der erforderlichen Reihenwicklung hinzuzufügen, wie auf Seite 216 erwähnt wurde. Zur Vervollständigung der zuletzt genannten Formeln müsste S durch den Wert $S - Dv$ ersetzt werden.

Gleichbleibende Spannung am fernen Ort.

Es muss ferner bemerkt werden, dass, abgesehen von der entmagnetisirenden Thätigkeit des Ankers, der von den Reihenwickelungen zu liefernde Betrag magnetischer Erregung stets den Widerständen proportional ist, die im Hauptkreise und innerhalb derjenigen Punkte sich befinden, für die gleichbleibende Spannung gefordert wird; hierdurch wird es möglich, in dem Falle, wo die Hauptzuführungen von der Maschine bis zu den Lampen lang sind, die Maschine durch Hinzufügung von Reihenwickelungen so einzurichten, dass sie nicht an den Klemmen gleichbleibende Spannung liefert, sondern am entfernten Punkte des Stromkreises, wo die Lampen in Thätigkeit treten sollen.

Wenn Lampen sehr entfernt von der Dynamomaschine betrieben werden sollen, wie dies z. B. bei der Beleuchtung von Bergwerken der Fall ist, so lässt sich durch geeignete Bemessung der gemischten Wickelung erzielen, dass an einem Punkte in der Mitte des Betriebsnetzes gleichbleibende Spannung herrscht. Es ergibt sich dabei noch ein anderer Vortheil; denn wird die Maschine voll belastet, so geht auch die sorgfältigst geregelte Betriebsmaschine doch etwas zurück und bedingt dadurch einen weiteren Abfall der Spannung. Als ein Beispiel dafür, was sich durch Zusatzwickelungen erreichen lässt, kann der in Fig. 292 dargestellte sechspolige Stromerzeuger für Strassenbahnen dienen, der ungefähr 4000 Ampere-Windungen für jeden Pol bei offenem Stromkreis erforderte, jedoch eine solche Reihenwicklung hatte, dass bei voller Belastung 6000 Ampere-Windungen für jeden Pol hinzugefügt werden konnten.

Anordnung der gemischten Wickelung.

Gemischte Wickelungen lassen sich in verschiedener Weise anordnen. Auf demselben Kern werden die Nebenschlusswickelungen zuweilen auf die Reihenwickelungen gelegt, weniger häufig legt man

die Reihenwickelungen aussen auf die Nebenschlusswickelungen. Da die Reihenwickelungen einen Theil des Hauptkreises bilden, so ist die Herabminderung des Widerstandes zu empfehlen. Die Vergrößerung des Widerstandes einer Nebenschlusswickelung, die infolge eines grösseren Windungsdurchmessers entsteht, ist jedoch kein Nachtheil. In früheren Ausgaben dieses Werkes war empfohlen worden, die Reihenwickelungen näher an den Pol zu legen, als die Nebenschlusswickelungen. Wenn jedoch der magnetische Kreis durch die Eisenmassen hindurch gut ist, so bedingt die Lage der Wickelungen nur einen geringen Unterschied.

Praktisches Verfahren zur Bestimmung der Verbundwickelung.

Aus dem Vorhergehenden wird einleuchtend, dass eine Verbundmaschine, die bei offenem Stromkreise läuft, so dass nur Strom im Nebenschlusse kreist, an ihren Klemmen dieselbe Spannung zeigen soll, wie sie solche als Verbundmaschine im Betriebe liefert. Dies führt auf ein praktisches Verfahren zur Bestimmung der Verbundwickelung. Der Anker der Maschine möge mit der durch mechanische Erwägungen vorgeschriebenen besonderen Geschwindigkeit umlaufen und ein Spannungsmesser an die Klemmen gelegt werden. Es werden dann zwei Versuche nothwendig.

Zuerst bestimmt man mittels zeitweise um den Feldmagnet gelegter Wickelungen von bekannter Windungszahl die Anzahl der Ampere-Windungen, welche genügt, um den Magnet bis zu dem für den Betrieb nöthigen Grade zu erregen. Zu diesem Zwecke wird durch die Windungen ein Strom aus einigen Sammlern oder einer anderen Maschine, dessen Stärke zu messen ist, geleitet. Hieraus kann S bestimmt werden, denn es ist von vornherein bekannt, dass i_s etwa 2 v. H. des Stromes bei voller Belastung beträgt. Zweitens bringt man in den Hauptkreis etwas Widerstand, um das Maximum der Lampenbelastung zu erhalten. Während die Maschine mit der betriebsmässigen Geschwindigkeit läuft, bestimmt man, immer noch unter Einwirkung der zeitweilig umgelegten und durch die Sammler mit Strom versehenen Wickelung, welche Zahl erregender Ampere-Windungen im Ganzen nothwendig ist, wenn die Maschine volle Leistung liefert; von dieser Zahl zieht man den beim ersten Versuch erhaltenen Werth $S i_s$ ab; der Rest liefert die Zahl der Ampere-Windungen, welche die Reihenwickelung hervorbringen muss. Da die maximale Stromstärke bekannt ist, so kann auch S_h berechnet werden.

Dasselbe Verfahren lässt sich anwenden, wenn Zusatzwindungen bestimmt werden sollen; die Erregung bei voller Belastung wird dann so lange gesteigert, bis die Klemmenspannung um die dem Abfall in den Leitungen entsprechende Anzahl Volt gestiegen ist.

Entwurf von Maschinen für Gleichspannung.

Von wesentlicher Bedeutung ist es bei derartigen Maschinen, die Eisentheile so zu bauen, dass 1. die Charakteristik in demjenigen Theile nahezu gerade ist, der dem Arbeitsbereich des Stromes entspricht, für den die Selbstregelung gefordert wird; 2. dass die Charakteristik nicht abfällt. Demzufolge ist es wichtig, das Eisen im magnetischen Kreise solcher Maschinen gerade in solcher Menge zu verwenden, dass der Strom im Nebenschlusse die anfängliche Magnetisirung bis über das Knie in der Curve der Magnetisirung hinauftreibt und dass die vom Ankerstrom her rührenden Gegenwirkungen geringer sind. Auch muss der Widerstand des Ankers so gering als möglich gehalten werden.

Charakteristik der Verbundmaschine.

In der von Deprez angegebenen Theorie der Maschinen für Gleichspannung stützte sich die Beweisführung auf das Fehlen der Sättigung und das Vorhandensein einer anfänglichen unabhängigen Magnetisirung. Der Beweis von Deprez war folgender:

Ist eine dauernde magnetische Erregung vorhanden, die gänzlich unabhängig von der Hauptwicklung der Maschine auftritt, so wird die Charakteristik (Fig. 157) nicht vom Punkte O ausgehen, sondern von irgend einem oberhalb belegenen Punkte, dessen Lage von dem Betrage der unabhängigen Magnetisirung und der Geschwindigkeit abhängt. Es sei dies der Punkt P . OP bedeutet die elektromotorische Kraft bzw. die Klemmenspannung, wenn der Stromkreis offen ist; da ein Strom erst bei geschlossenem Kreise auftritt, so steigt dann die Charakteristik in gewöhnlicher Weise von P bis Q . Man ziehe die Linie OJ unter einem solchen Winkel, dass seine Tangente den Widerstand des Ankers und der Reihenwicklung zusammen darstellt. Ferner ziehe man eine Linie OE unter solchem Winkel, dass die Tangente den gesammten Widerstand des Kreises zu irgend einer Zeit darstellt. Ex bedeutet dann die elektromotorische Kraft in diesem Zeitpunkte, während der Theil ax den Verlust im Widerstande des Ankers und der Reihenwicklung darstellt. Der Rest Ea ist die Spannung an den

Endpunkten des äusseren Kreises. Die Aufgabe lässt sich demnach darauf zurückführen, eine solche Anordnung zu treffen, dass Ea stets die gleiche Grösse wie OP besitzt, ohne Rücksicht darauf, welche geringere oder grössere Neigung die Linie OE hat. Der einzige Weg zur Erreichung dieses Zieles ist offenbar der: die Geschwindigkeit der Maschine so zu wählen, dass der Theil von P bis Q parallel zu OJ läuft. Wird die Geschwindigkeit genau auf die richtige Höhe gebracht, so wird die Neigung der Charakteristik dieselbe wie die der Linie OJ sein. Dann ist, wie aus der Fig. 158 hervorgeht, die Klemmenspannung gleichbleibend. Man ersieht, dass dies mit den durch algebraische Behandlung der Frage erhaltenen Schlüssen übereinstimmt: nämlich, dass die kritische Geschwindigkeit

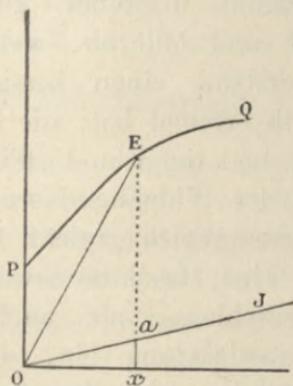


Fig. 157.

Charakteristik der Maschine mit gemischter Wickelung.

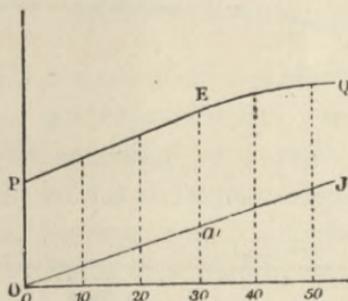


Fig. 158.

dem inneren Widerstande proportional ist und dass die gleichbleibende Spannung Ea derjenigen gleich ist, die der unabhängigen Magnetisirung OP bei der kritischen Geschwindigkeit entspricht. Es wäre gleichfalls zu erwähnen, dass die Regelung nicht vollkommen sein kann, wenn der betreffende Theil der Charakteristik keine Gerade bildet, d. h. wenn die Kerne des Feldmagnetes gesättigt werden. Ist die Linie PQ gekrümmt, so ist die Spannung bei grosser Stromstärke nicht gleich derjenigen bei geringer Stromstärke. Wurden bei dem praktischen Verfahren zur Bestimmung der Magnetwindungen die Wickelungen so bemessen, dass e sowohl bei offenem Stromkreise (d. h. bei OP) als auch für irgend einen anderen Punkt (z. B. bei Q), in Bezug auf den die Maschine ihre grösste Belastung hat, die erforderliche Grösse besitzt, so wird man im Allgemeinen für Zwischenbelastungen eine etwas grössere Spannung erhalten. Dieses zeigt sich im convexen Theile der Curve zwischen P und Q .

Vorstehende Beweisführung trifft zu, wenn es sich um unabhängige Erregung durch Dauermagnetismus oder um eine Schaltung mit besonderer Erregerwicklung (vergl. S. 53 und 216) handelt, oder auch, wenn die Maschine durch Zufügung einer Nebenschlusswicklung zu einer gemischt gewickelten gemacht worden ist. Im letzteren Falle bedeutet OP die vom Nebenschlusse allein herrührende Klemmenspannung.

Wir wollen die Verbundmaschine noch aus einem anderen Gesichtspunkte betrachten.

Auf Seite 199 finden sich zwei Curven — keine Charakteristiken — aus denen die Beziehung der Klemmenspannung zum äusseren Widerstande für eine Reihen- und für eine Nebenschlussmaschine zu ersehen ist. Die eine Curve beginnt in einer gewissen

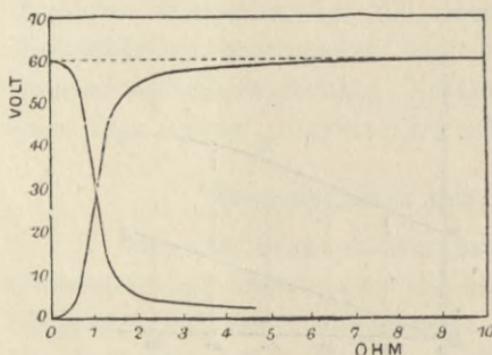


Fig. 159.

Höhe und fällt ab, wenn der Widerstand einen bestimmten Werth erreicht hat; die andere entspringt tiefer und steigt, sobald der Widerstand einen bestimmten Werth erreicht. Richtet man eine Maschine sowohl mit Nebenschluss- als auch mit Reihenwicklung ein, so dass sie mit jeder bei derselben Geschwindigkeit sich bis zu derselben Spannung hinaufarbeitet und der Widerstand, bei dem die

eine Curve abfällt, gerade so gross ist, als der, bei dem die andere steigt, so liefert die Maschine, wie aus der Fig. 159 ersichtlich wird, mittels der doppelten Wickelung Gleichspannung. Wir werden sehen, in wie weit dies für die Praxis erreicht wird.

Aeusserere Charakteristiken selbstregelnder Maschinen.

Gleichzeitige Beobachtungen der Stromstärke im äusseren Kreise und der Spannung e ermöglichen den Entwurf der äusseren Charakteristik; für eine vollkommen selbstregelnde Dynamomaschine würde diese Linie eine Gerade sein. Ist die Anzahl der regelnden Reihenwindungen zu gering, so fällt die Charakteristik ab, sobald der Strom ansteigt; ist die Zahl zu gross, so neigt sie sich etwas nach unten in der Nähe der Ordinatenachse. Daß Letztere bildet nicht stets einen Nachtheil; denn bei Maschinen, die einzeln von einer Arbeitsmaschine getrieben werden, steigt die Geschwindigkeit häufig

aus Anlass der unvollkommenen Regelung der Arbeitsmaschine, sobald die Belastung der Dynamomaschine gering wird.

Beobachtungen von Esson. Verschiedene von Esson im Juni 1885 im *Electrician* veröffentlichte Beobachtungen sind näherer Betrachtung werth.

Esson stellt die Frage, wie es kommt, dass Verbundmaschinen, die gewickelt sind, um für eine gegebene Geschwindigkeit selbstregelnd zu wirken, doch innerhalb beträchtlicher Grenzen noch bei jeder anderen Geschwindigkeit sich gut regeln. Zur Erklärung dieser Eigenthümlichkeit bemerkt er, es seien in keiner Dynamomaschine die Masse oder die Eigenschaften des Eisens derartig, dass die Sättigungswirkung vernachlässigt werden kann. Wäre der Magnetismus den Ampere-Windungen der Erregung genau proportional, so würde es buchstäblich eine kritische Geschwindigkeit geben.

Die Näherungsregel $\frac{N}{N_s} = \frac{r_a + r_m}{r_s}$ ergibt eine zu geringe Zahl von Reihenwindungen; denn wenn die Nebenschlusswicklung bereits einen gewissen Grad von Magnetismus hervorgerufen hat, vermag die Reihenwicklung diesen nicht verhältnissmässig zu vermehren. In einer Reihenmaschine (für 20 Ampere) ist die elektromotorische Kraft, die durch Anwachsen des erregenden Stromes von 5 auf 10 Ampere hinzutritt, viel grösser als diejenige Kraft, die durch Anwachsen des Stromes von 10 auf 15 Ampere hinzugefügt wird. Eine selbstregelnde Maschine für 100 Volt, in der der Nebenschluss genügende Erregung lieferte, um bei offenem Kreise 100 Volt zu erzeugen, besass Reihenwickelungen, mittels deren man nach Entfernung des Nebenschlusses und bei voller Stromstärke 60 Volt Klemmenspannung erzeugen konnte. Der Werth der Reihenwicklung für die magnetische Erregung vermindert sich, wenn die vom Nebenschlusse herrührende Erregung steigt. Alles dies ergibt sich aus der Verminderung der magnetischen Durchlässigkeit des Eisens in der Maschine, sobald der Sättigungsgrad steigt. Es folgt daraus, dass eine gewisse Beziehung zwischen der Umlaufgeschwindigkeit und dem Grade der magnetischen Erregung, die von der Nebenschlusswicklung herrührt, bestehen muss. Der vom Nebenschluss gelieferte Magnetismus aber hängt auch von der Geschwindigkeit ab und steigt mit ihr. Ist deshalb bei irgend einer Geschwindigkeit die Beziehung derart, dass Selbstregelung erzielt wird, so wird die Beziehung bei anderen Geschwindigkeiten fast ebenso zutreffen.

In betreff weiterer Belehrung über die gemischte Wickelung möge auf eine Reihe von Aufsätzen im Electrician (1883) von Kapp, auch auf zwei Aufsätze von Esson im Electrician aus dem Juni 1885 verwiesen werden. Ebenso vergleiche man Aufsätze von Hospitalier im Electrician, von Uppenborn im Centralblatt für Elektrotechnik, besonders aber die Reihe Abhandlungen von Frölich in der Elektrotechnischen Zeitschrift für 1885 und die noch neuere bemerkenswerthe Abhandlung von Rücker im Philosophical Magazine aus dem Juni 1885. Spätere Beiträge lieferten Zickler im Centralblatt für Elektrotechnik, Bd. 9, S. 264, 1887 und Baumgardt, ebenda, Bd. 10, S. 281, 1888, ferner Louis Bell in the Electrical World, Bd. 16, S. 383, 1891.

Kapitel XII.

Theorie der Ankerwicklung (Gleichstrom).

Das vorliegende Kapitel behandelt die Art und Weise, in der die Ankerleiter der Maschinen verbunden und geschaltet werden. Die Einzelheiten in betreff des Materials und der Bauart werden im Kapitel XIII erörtert werden.

Es ist schon auf Seite 38 erwähnt worden, dass, abgesehen von Bogenlichtmaschinen, die häufig Anker mit offener Wickelung besitzen, Gleichstrommaschinen mit geschlossener Ankerwicklung ausgerüstet werden. Derartige Wickelungen, seien sie auf einen Ring, eine Trommel oder eine Scheibe gelegt, sind stets in sich geschlossen, der hineingelangende Strom vertheilt sich mindestens auf zwei Wege, die Theile vereinigen sich wieder beim Austritt aus dem Anker. In zweipoligen Maschinen sind nur zwei solcher Wege zur Verzweigung des Stromes vorhanden. In vielpoligen Maschinen können zwei oder mehr Wege mit einer oder mit mehr als einer Verzweigung des Stromes vorhanden sein.

Die elektromotorische Kraft der Maschine hängt offenbar von der Art der Verbindung der Leiter ab, und zwar von dem Umstande, welche Zahl wirksamer Leiter hintereinander geschaltet sind. Daher ist das Verständniss der Theorie der Ankerwicklung erforderlich.

Es bietet keine Schwierigkeiten, die Leiter auf einem Anker richtig so zu schalten, dass das geforderte Ergebniss erzielt wird, wenn es sich um Ringanker für Gleichstrommaschinen — zweipolige oder vielpolige — handelt.

Weniger leicht ist die Aufgabe bei Trommelankern, besonders bei solchen für vielpolige Maschinen. Oft gelangt man auf verschiedenen Wegen zum Ziel; die Thatsache, dass elektrisch gleichwerthige Wickelungsarten geometrisch und mechanisch verschieden sein können, macht eine systematische Methode zur Behandlung des Gegenstandes wünschenswerth.

In dem Kapitel III ist bereits der elementare Aufbau von Ring-, Trommel- und Scheibenankern betrachtet worden. Dies würde für kleine Anker mit nur wenigen Drahtwindungen genügen.

Beabsichtigt man indessen den Entwurf grosser Maschinen oder von Maschinen für hohe Spannung von 400 oder mehr Volt, so bedarf es weiterer Unterweisung. Setzen wir z. B. eine Maschine mit vier Polen und einem Stabanker mit 100 an der Oberfläche vertheilten Stäben voraus. Sämmtliche Stäbe bilden fortlaufend eine Lage; wollen wir die Endverbindungen schalten, so ist eine Anweisung nothwendig, in welcher Reihenfolge die Verbindungen auszuführen sind. Verbindet man das vordere (dem Stromabgeber zugewendete) Ende des Stabes 1 querüber mit dem Stabe 50 oder 49, oder über ein Viertel des Umfanges mit dem Stabe 25 oder 24 oder mit dem Stabe 75 oder 76? Mit welchem Stabe ist das hintere Ende des Stabes 1 zu verbinden? Welche Stäbe müssen abwärts mit dem Stromabgeber verbunden werden?

Hierüber soll das vorliegende Kapitel Auskunft geben, wenn auch nur in Kürze. Eingehendere Rathschläge findet man in den Abhandlungen von Hering¹⁾, Arnoux²⁾, Fritsche³⁾, Weymouth⁴⁾, Arnold⁵⁾, Parshall und Hobart⁶⁾, sowie von Anderen, auf welche noch besonders Bezug genommen wird.

Wie schon früher bemerkt, bietet eine Ringwicklung, wenn man nur den Unterschied zwischen rechts- und linkslaufender Wicklung festhält, im Allgemeinen geringe Schwierigkeit.

Die Fig. 160 zeigt einen Theil einer Ringwicklung; die Richtung der Ströme ist ebendieselbe, wie in den Fig. 60 bis 62 angegeben. Geht man rechts herum von *a* zu *b* über, so ist eine rechtslaufende Spirale zu verfolgen, der Strom zeigt (vergl. S. 57 und 58) zur positiven Bürste nach oben. Für eine linkslaufende Wicklung (wie in Fig. 178) würde die positive Bürste abwärts liegen, falls nicht der Umlauf des Ankers oder die Polarität der Maschine umgekehrt wird. Anders stellt sich die Sache bei Trommelankern. Um hier festzustellen, ob die Wicklung rechts- oder linkslaufend

1) Hering, Principles of Dynamo Electr. Mach. New York, 1891.

2) L'Electricien, Bd. 12, S. 737, 774, 827. 1888.

3) Fritsche, Die Gleichstrom-Dynamomaschine. Berlin, 1889.

4) Weymouth, Drum Armatures and Commutators. London, 1893.

5) Arnold, Die Ankerwicklung der Dynamomaschinen. Berlin, 1891. 2. Aufl. 1896.

6) Parshall und Hobart, Armature Windings of Electric Machines. New York, 1895.

ist, müssen wir erst bestimmen, von welchem Punkte aus wir die Wickelung betrachten; gewöhnlich ist dies das Commutatorende der Wickelung. Ferner müssen wir einen bestimmten Drehungssinn — z. B. Rechtsdrehung wie der Zeiger einer Uhr — bestimmen, in welchem wir die Reihe der Stromwenderstäbe zählen. Wenn wir diese beiden Punkte bestimmt haben, kann eine rechtslaufende Wickelung in folgender Weise definiert werden: Diejenige Wickelung ist rechtslaufend, welche von einem Stromwenderstabe zum andern (in der oben bestimmten Richtung) führend, einen rechtsgängigen Schraubengang bildet. Betrachten wir nun die Figur 161, welche ein Element oder eine Abtheilung einer aus 40 äusseren Leitern bestehenden Trommelwicklung darstellt. Verfolgt man den Weg von *a* nach *b* und merkt auf die Richtung der Ströme in den

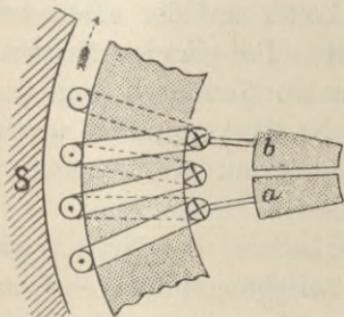


Fig. 160.
Rechtsgängige Ringwicklung.

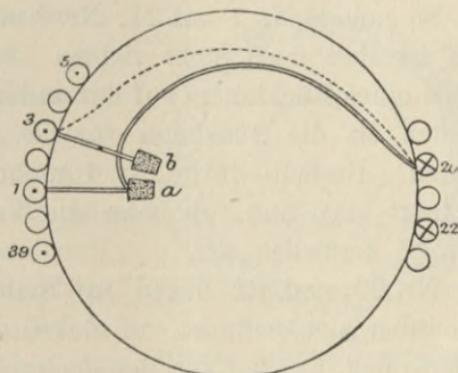


Fig. 161.
Rechtsgängige Trommelwicklung.

Leitern, so wird klar, dass *a* eine Verbindung über das vordere Ende der Trommel weg zu einem der entgegengesetzten Leiter, etwa zu Nr. 20 erhalten muss; vom hinteren Ende jenes Leiters muss dann wieder eine Verbindung zu einem auf der linken Seite der Trommel nach vorn führenden Leiter, etwa mit Nr. 3 (punktirte Linie) hergestellt werden; letzterer wird schliesslich mit *b* verbunden. Damit ist eine rechtslaufende Windung fertig gestellt. Man prüfe nun die Fig. 173 und 178; sie stellen beide links laufende Wickelungen dar, die letztere besitzt acht Drahtwindungen in einer Abtheilung.

Wenn in der Fig. 161 die Zurückführung von Nr. 20 zu Nr. 3 auch unterhalb anstatt oberhalb der Achse stattfände, so würde die Wickelung deshalb doch rechtslaufend bleiben.

Es ist nun zu bestimmen, über wie viele Leiter hinweg die Verbindungen führen müssen. Wir verbanden Nr. 1 (über den Stab *a* des Stromabgebers hinweg) mit Nr. 20 und diesen Leiter

wieder am hintern Ende der Trommel mit Nr. 3. Um zu verstehen, warum wir Nr. 20, und nicht etwa Nr. 21 oder Nr. 19 oder Nr. 18 wählten, muss man die Aufgabe der Stromwendung in den Leitern im Ganzen betrachten und erwägen, dass zwei Wege von Bürste zu Bürste durch die Wickelungen vorhanden sind. Da auf der Trommel 40 Leiter in einer Lage sich befinden, so besitzt der Stromabgeber 20 Stäbe.

Da die inducirte elektromotorische Kraft die Richtung von rückwärts nach vorn in denjenigen Leitern besitzt, die zur linken Seite aufwärts steigen und die Richtung von vorn nach rückwärts in denjenigen Leitern, die rechts abwärts laufen, so ist es natürlich, anzunehmen, dass jeder Leiter mit einem ihm diametral gegenüberliegenden verbunden werden müsste.

So müsste Nr. 1 mit 21, Nr. 2 mit 22 u. s. w. verbunden werden. Dies ist aber doch nicht richtig. Jeder Leiter auf der einen Seite bedarf eines Rückleiters auf der andern Seite. Die geraden Nummern könnten als die Rückleiter für die ungeraden Nummern angesehen werden. Deshalb dürfte Nr. 1 nicht mit Nr. 21 verbunden werden. Es fragt sich nun, ob man die Verbindung mit Nr. 20 oder 22 oder 18 herstellen soll.

Nr. 20 und 22 liegen zur Seite des Leiters, der Nr. 1 gerade gegenüber sich befindet, in elektrischer Beziehung bildet es keinen Unterschied, welcher von den beiden Leitern ausgewählt wird. Wollen wir eine Verbindung zum Rückleiter benutzen, die, wie in der Fig. 161, oberhalb der Welle verläuft, so ersparen wir bei der Wahl von Nr. 20 etwas an Kupfermasse. Führt man die hintere Verbindung dagegen unterhalb der Welle, so kann man jeden der beiden Leiter wählen. Bei der Wahl von Nr. 18 würde mehr Kupfer erspart werden, wenn man oberhalb der Achse zurückkehrt, da die gebogene Verbindung kürzer wird. Benutzen wir aber zur Herstellung der Verbindung den Weg einer kurzen Sehne, anstatt einer dem Durchmesser sehr nahe liegenden Sehne, so entsteht die Gefahr, dass elektromotorische Gegenkräfte in den Windungen auftreten, die hintereinander von Bürste zu Bürste liegen. Wie anderseits Swinburne nachgewiesen hat, bietet die Auswahl einer kurzen Sehne als Verbindungsweg den Vortheil, dass der Anker eine weniger stark entmagnetisirende Wirkung ausübt.

Die Wirkung einer Wickelung über einer Sehne, die durch die Breite des Polstückes gegeben ist, zeigt die Fig. 162. Man ersieht hieraus, wie der Gürtel der entmagnetisirenden Leiter zwischen den Polspitzen durch einen Gürtel ersetzt wird, in dem die Ströme in

zwei entgegengesetzten Richtungen fließen und sich in ihren Wirkungen neutralisiren. In keinem Falle sollte die Sehne einen kleineren, als den durch die Polfläche bestimmten Bogen abschneiden. Die Regel für die Verbindungen an einem einfachen zweipoligen Trommelanker ergibt sich in folgender Weise:

Ist die Zahl N der Leiter eine gerade, so muss die vordere Verbindung von jedem Leiter querüber zu dem Leiter laufen, der $\frac{1}{2}N \pm 1$ weiter (oder $\frac{1}{2}N \pm 3$, zur Abkürzung der Sehne) liegt, und die hintere Verbindung muss zu dem zweitnächsten Leiter zurückführen.

In der nachstehenden Wickelungstafel bedeuten die Buchstaben V und R vorn und rückwärts, die Buchstaben H und Z bedeuten: von rückwärts nach dem vorderen Ende des Ankers hin, bzw. von dem vorderen Ende zurück. Beginnt man mit dem Leiter 1, so folgen wir diesem also von vorn nach rückwärts hin, verbinden ihn dort mit Nr. 22, gelangen mit diesem Leiter nach vorn und über einen Stab des Stromabgebers zu Nr. 3 (zweitnächster von Nr. 1, vergl. vorhin), folgen diesem nach rückwärts und verbinden ihn am hinteren Theile des Ankers mit Nr. 24 und so weiter. Die Ueberdeckung findet in allen Fällen 21 mal statt. Endlich gelangt man zu Nr. 20, von dem aus wir nach vorn zurückkehren und ihn über den letzten Stab des Stromabgebers mit Nr. 1 verbinden.

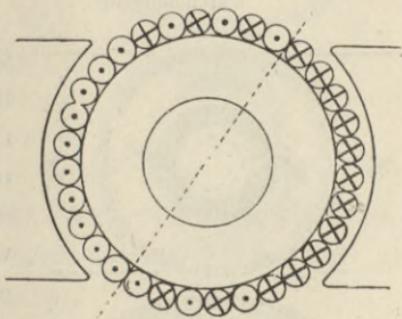


Fig. 162.
Wirkung einer Sehnenwicklung.

V	R	V	R	V	R	V	R	V
Z	H	Z	H	Z	H	Z	H	
1	22	3	24	5	26	7	28	
9	30	11	32	13	34	15	36	
17	38	19	40	21	2	23	4	
25	6	27	8	29	10	31	12	
33	14	35	16	37	18	39	20	

So einfach die Sache nun auch scheint, so ist doch die Aufgabe, wie man an dem einen Ende der Trommel die Verbindung von einem Leiter zum andern in der beschriebenen Weise legt, nicht

ganz leicht, sobald die mechanischen und elektrischen Schwierigkeiten mit in Betracht gezogen werden. Zur Kürzung der langen spiraligen

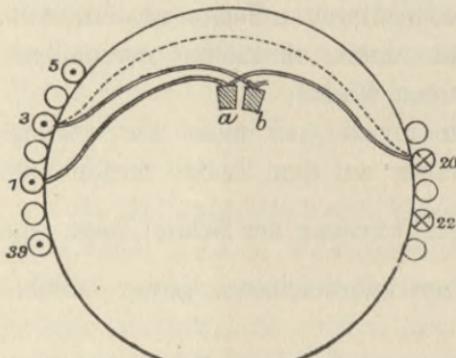


Fig. 163.
Trommelwicklung mit zwei Sätzen spiraliger Verbindungen.

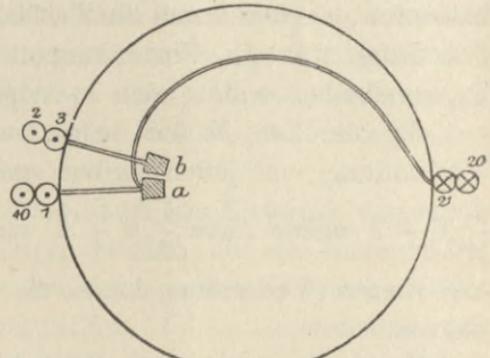


Fig. 164.
Trommelwicklung mit zwei Lagen.

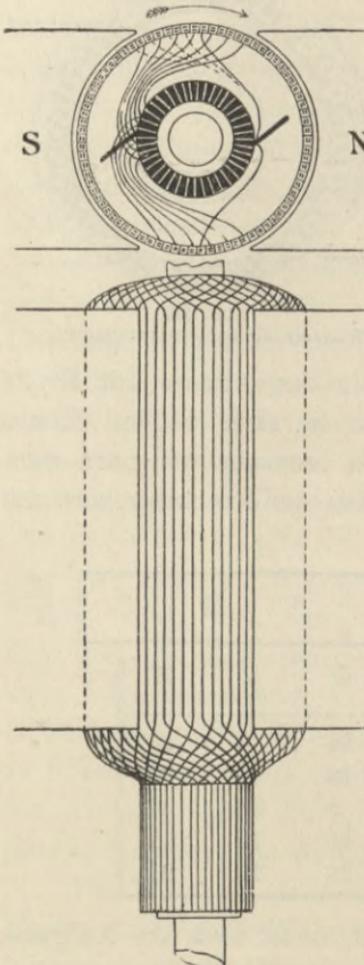


Fig. 165.
Trommelwicklung der Edison-Hopkinson-Maschine.

Leiter und Herstellung einer Symmetrie bei den Endverbindungen, wird häufig die in der Fig. 163 dargestellte Anordnung benutzt. Die Spiralen werden dann in zwei Lagen übereinander gelegt wie in der Fig. 231 und Tafel IV angedeutet ist. Dies hat zur Folge, dass der Stromabgeber um etwa einen Quadranten gedreht wird, so dass die positive Bürste sich links anstatt oben befindet. Diese Anordnung findet man u. A. in der Maschine von Edison-Hopkinson. Sie besitzt den Vortheil, dass sämtliche Verbindungen vorn und rückwärts von gleicher Grösse hergestellt werden können.

Werden die Leiter in zwei Lagen übereinander angeordnet, so können die Wicklungen bis zu dem Stromabgeber in einen Durchmesser gelegt werden, die letzte Windung querüber zur nächsten in derselben Lage. Die Leiter der äusseren Lage entsprechen dann den Zwischengliedern der Wicklung in einer Lage.

In der Fig. 164 ist das Ende von Nr. 1 an den Stab *a* gelegt, von da geht

eine Verbindung nach Nr. 21, die am hinteren Ende des Ankers querüber zu Nr. 3 führt u. s. w. Die Fig. 165 stellt die Verbindung von 80 Leitern in der Maschine von Edison-Hopkinson dar; es sind zwei Lagen von je 40 Leitern und ein 40 theiliger Stromabgeber vorhanden.

Wicklungs-Diagramme.

Wenn man sämtliche Leiter einer Trommelwicklung zu zeichnen versucht, so kreuzen sich die Linien, und es entsteht leicht Verwirrung. Von grossem Vortheil ist daher die von Fritsche zuerst angegebene Darstellung¹⁾, nach der die Ankerwicklung insgesamt auf einer Fläche gezeichnet erscheint. Man betrachte die Fig. 166 als Zeichnung einer umgekippten vierpoligen Maschine. Der als Ring- oder Trommelanker hergestellte Kern liegt innerhalb der vier abwechselnden Pole. Denkt man sich einen Kupferstab *a* parallel zur Achse als einen der Ankerleiter und rechtsgängig durch den Zwischenraum nach dem *S*-Pol bewegt, so

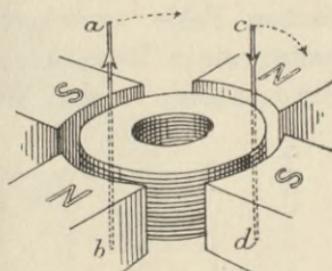


Fig. 166.
Ansicht eines vierpoligen Feldes.

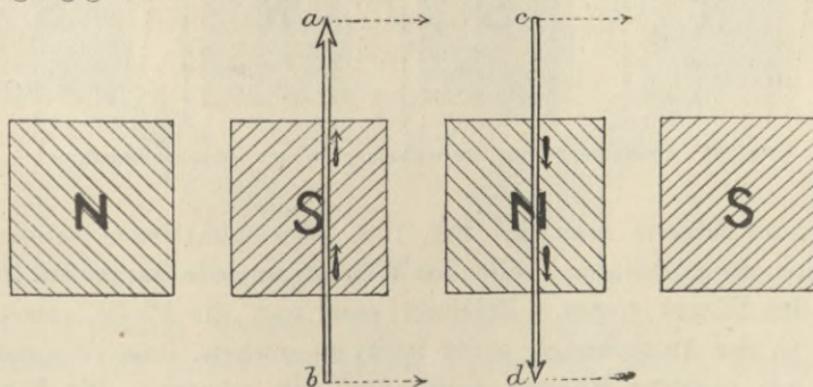


Fig. 167. Vierpoliges Feld in eine Ebene abgewickelt.

schneidet er bei der Näherung die magnetischen Linien. Nach der gegebenen Regel wird in dem Stabe eine nach aufwärts gerichtete elektromotorische Kraft inducirt. Ein anderer, am *N*-Pol vorbeigehender Leiter erhält eine nach abwärts gerichtete elektromotorische Kraft. Würde man diesen Vorgang für 20 oder mehr Leiter durch eine Zeichnung darstellen wollen, so müsste letztere unübersichtlich werden.

1) Centralbl. f. Elektrot., Bd. 9, S. 649, 1887.

Deshalb denken wir uns selbst im Mittelpunkt befindlich und die Innenflächen der Pole in eine Ebene auseinander gelegt, wie dies die Fig. 167 zeigt. Zur Unterscheidung sind die *N*- und *S*-Pole schräg schraffirt ¹⁾.

In einer Dynamomaschine finden sich viele Ankerleiter in der Runde symmetrisch angeordnet und müssen gruppenweise mittels der Verbindungen geschaltet werden.

Bei einem Ringanker laufen die im Zwischenraum wirksamen Leiter durch die Mittelöffnung des Ringes, wenn sie aus dem magnetischen Felde zurückgeführt werden. Setzen wir der Einfachheit halber einen Ringanker mit nur 12 Windungen und 12 Stäben am Stromabgeber voraus. Würde dieser Ringanker von Innen auseinander

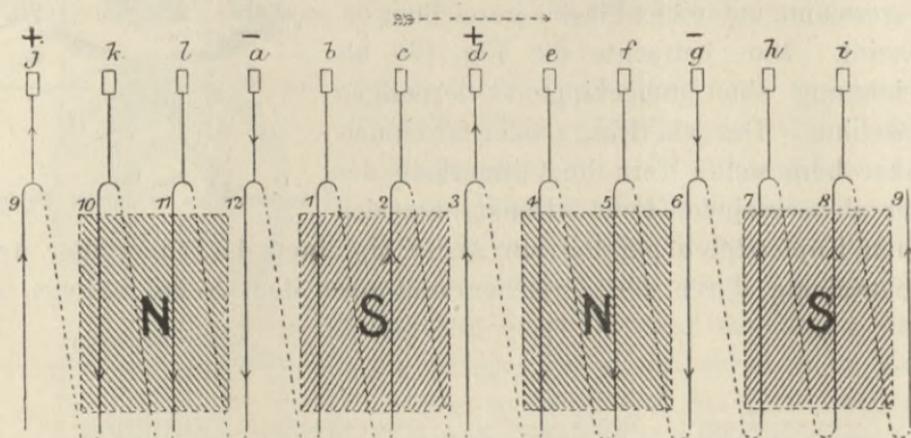


Fig. 168. Abwicklung einer Ringwicklung für eine vierpolige Maschine.

gelegt, so erhielte man die Fig. 168. Die punktierten Linien bezeichnen die unthätigen Theile der Windungen, die durch die Innenseite des Ringes treten. Zeichnet man nun die Pfeile (nach der Regel in der Anmerkung), so ist leicht zu ersehen, dass zwei positive und zwei negative Bürsten vorhanden sein müssen. Die Fig. 169 liefert eine Endansicht derselben Wicklung zur Vergleichung beider

1) Die schrägen Linien sind aus folgendem Grunde gewählt worden. Wenn man an Stelle der einen Leiter darstellenden Linien *ab* einen Papierstreifen mit schmalen Schlitz über die Polfläche legt und den Streifen in der Richtung der Pfeile (bei *a* und *b*) parallel mit sich selbst nach rechts hin bewegt, so erscheint durch den Schlitz eine Bewegung der Linien in der Richtung vor sich zu gehen, in der der Strom wirklich fließt. Es lässt sich auch leicht behalten, in welcher Richtung die Linien in den Polflächen zu zeichnen sind; denn die Linien auf dem *N*-Pol laufen parallel mit dem Mittelstrich des eingezeichneten Buchstabens *N*.

Darstellungsarten. Es ist klar, dass in diesem Falle der Anker zur Lieferung von zwei besonderen Strömen benutzt werden kann, obwohl solches eben nicht rathsam sein würde. Man verbindet vielmehr die positiven Bürsten miteinander, die negativen ebenfalls. Eine sechspolige Maschine würde sechs Bürsten erfordern u. s. w.

Man vergleiche hierzu die Tafel VIII.

Werden die Bürsten desselben Vorzeichens miteinander verbunden, so ist die elektromotorische Kraft gleich der in einem Wickelungssatz von der + Bürste zur - Bürste erzeugten Kraft.

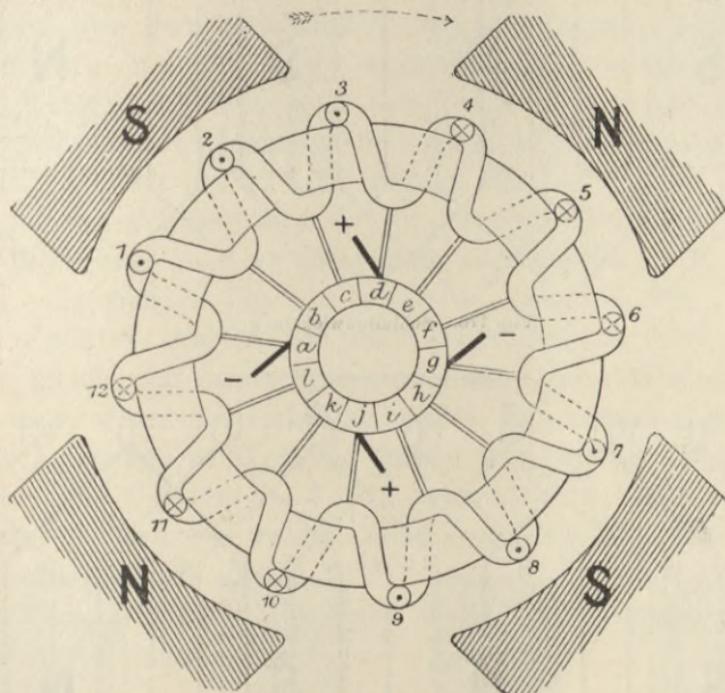


Fig. 169. Ringwicklung einer vierpoligen Maschine (entspricht Fig. 168).

In der vierpoligen Maschine bilden die Wickelungen in den vier Quadranten vier parallel geschaltete Theile; der innere Widerstand beträgt ein Sechzehntel der gesammten Ringwicklung. Es giebt aber, wie wir sehen werden, noch eine andere Art, die Wickelungen in einem vielpoligen Ring zu verbinden; es sind dann die Quadranten, anstatt sämmtlich parallel, hintereinander geschaltet, so dass nur zwei Paralleltheile gebildet werden. Diese Schaltung wird als mehrpolige Reihenwicklung bezeichnet. Sie erfordert nur zwei Bürsten, hat auch nur zwei neutrale Punkte am Stromabgeber, aber viele Pole um den Ring herum.

Schreiten wir zur Prüfung der Fälle, in denen die Wickelung ganz ausserhalb des Kernes liegt, wie in Trommelankern,

oder in denen überhaupt kein Kern vorhanden ist, nämlich in Scheibenankern, so sind zwei Arten von Wicklungen zu unter-

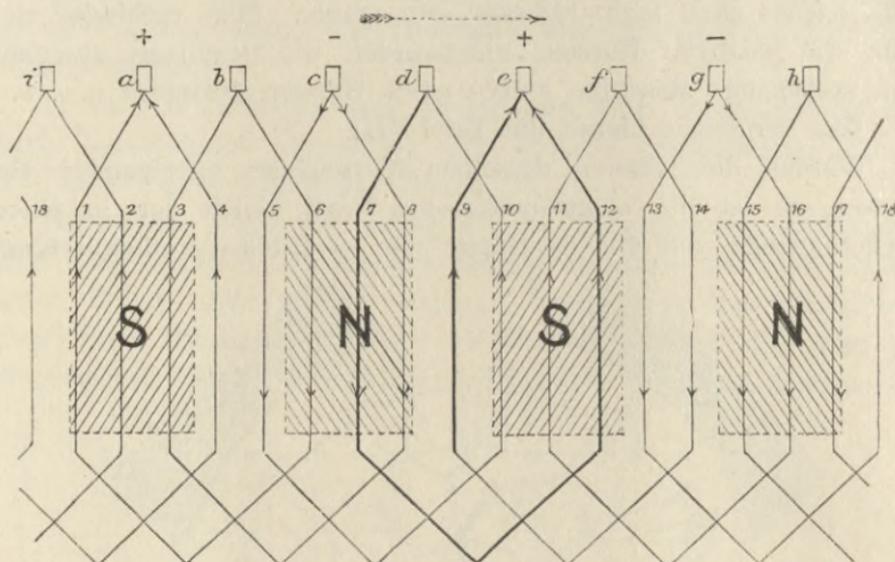


Fig. 170. Schleifenwicklung.

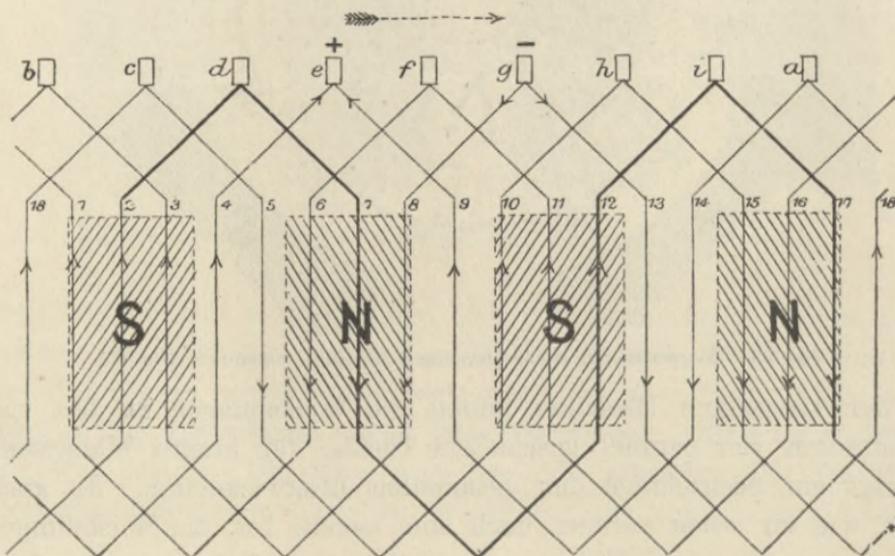


Fig. 171. Wellenwicklung.

scheiden. Man kann diese als Schleifen- und Wellenwicklung bezeichnen¹⁾.

1) Die hier gewählte Benennung rührt von Arnold her; auch Fritsche gebraucht den Namen Wellenwicklung. Wellenwicklungen wurden schon früher von Matthews, Bollmann und Müller angewendet; auch von Ferranti und Lord Kelvin für Wechselstrommaschinen.

Der Unterschied ergibt sich aus folgender Darstellung. Da die bei einem Nordpol vorbeigehenden Leiter elektromotorische Kräfte in der einen Richtung, und die bei einem Südpol vorbeigehenden Kräfte in der entgegengesetzten Richtung erzeugen, so müsste ein Leiter in einer dieser Gruppen mit einem benachbarten in entsprechender Lage verbunden werden, so dass der Strom in dem einen Leiter abwärts und im andern aufwärts in Uebereinstimmung mit den Richtungen der elektromotorischen Kräfte fließen kann.

Eine Prüfung der Fig. 170 belehrt uns, dass am hinteren Ende des Ankers (des dem Stromabgeber entgegengesetzten Endes) jeder Leiter mit dem um fünf Leiter weiterliegenden verbunden wird — 1 mit 6, 3 mit 8 — und dass an dem vorderen Ende der Wicklung (am Stromabgeber), nachdem ein Element (z. B. $d - 7 - 12 - e$) der Wicklung gebildet ist, sich ein zweites Element ($e - 9 - 14 - f$) anschliesst, das ersteres überdeckt; in derselben Weise geht es weiter, bis die Wicklung zum Anfangspunkte zurückkehrt.

Mit vorstehender Fig. 170 vergleiche man die Fig. 171. Am hinteren Ende des Ankers sind die Verbindungen in beiden Figuren einander gleich, am Stromabgeber aber sind sie verschieden. Man ersieht, dass, wenn die Wicklung zurück zum Stromabgeber geführt wird, sie einen andern Weg wie früher nach dem Stromabgeber zu einschlägt. Die Windung $d - 7 - 12$ kehrt nicht zu e zurück, sondern wird nach i geführt, von da aus läuft ein anderes Element $i - 17 - 4$ in einer Art Zickzack nach e .

Die Wickelungstafeln für diese beiden Trommelwicklungen gestalten sich wie folgt:

Tafel für die Schleifenwicklung (Fig. 170).

<i>V</i>	<i>R</i>		<i>V</i>
+ <i>a</i>	1	6	<i>b</i>
<i>b</i>	3	8	<i>c</i>
- <i>c</i>	5	10	<i>d</i>
<i>d</i>	7	12	<i>e</i>
+ <i>e</i>	9	14	<i>f</i>
<i>f</i>	11	16	<i>g</i>
- <i>g</i>	13	18	<i>h</i>
<i>h</i>	15	2	<i>i</i>
<i>i</i>	17	4	<i>a</i>

V = vorderes Ankerende (am Stromabgeber).

R = hinteres Ankerende.

Tafel für die Wellenwicklung (Fig. 171).

<i>V</i>		<i>R</i>		<i>V</i>	
<i>a</i>	1	6	<i>f</i>		
<i>f</i>	11	16	<i>b</i>		
<i>b</i>	3	8	<i>g</i>		
— <i>g</i>	13	18	<i>c</i>		
<i>c</i>	5	10	<i>h</i>		
<i>h</i>	15	2	<i>d</i>		
<i>d</i>	7	12	<i>i</i>		
<i>i</i>	17	4	<i>e</i>		
+ <i>e</i>	9	14	<i>a</i>		

Während mit der angegebenen Zahl von Leitern (18) die Schleifenwicklung in vier Paralleltheilen aufgeführt wird und vier Bürsten erfordert, besitzt die Wellenwicklung nur zwei Paralleltheile und braucht nur zwei Bürsten.

Wicklungsformeln für geschlossene Ankerwicklungen.

Allgemeine Formeln, die hauptsächlich auf Trommelwicklungen anwendbar sind, haben Hopkinson, Müller und Arnold angegeben. Im Wesentlichen folgen wir den Auseinandersetzungen des Letzteren. Für Ringwicklungen ergeben sich keine Schwierigkeiten, mit Ausnahme einiger Fälle, die später noch behandelt werden. Bei Trommelwicklungen dagegen gestaltet sich die Anordnung verwickelter, so dass Unterscheidungen gemacht werden müssen. Um eine Formel für die günstigste Anordnung der Leiter bei einer Trommelwicklung herzuleiten, ist es am besten, zunächst den einfachen Fall einer zweipoligen Maschine zu betrachten und dann erst zu prüfen, was zu geschehen hat, wenn mehr als zwei Pole vorhanden sind. Wir haben bei der Fig. 161 bemerkt, dass es, um eine symmetrische Wicklung zu erhalten, erwünscht ist, die geraden Leiterzahlen als Rückleitung für die ungeraden zu nehmen. In Fig. 161 liegt zwischen *a* und *b* nur eine Spirale, bei Hochspannungsmaschinen müssten deren mehrere vorhanden sein. Wir nennen nun denjenigen Theil der Wicklung, der zwischen zwei Stromabgeberstäben liegt, ein Element, ganz gleich, ob der Theil eine oder mehrere Spiralen bildet. Nehmen wir an, er bestehe aus fünf Spiralen, so bilden zehn Leiter ein Element, fünf davon bilden eine Gruppe oder Abtheilung auf der einen Seite des Ankers, und fünf eine solche auf der entgegengesetzten Seite. Wir müssen nun erwägen, wie viele Gruppen

wir zwischen zwei direct miteinander verbundene Abtheilungen legen wollen. Die Zahl der so überbrückten Gruppen wollen wir Gruppenzahl nennen und sie mit y bezeichnen (wenn z. B. Gruppe 8 mit Gruppe 15 verbunden ist, ist $y = 7$ die Gruppenzahl). y muss eine solche Beziehung zur Zahl sämtlicher Abtheilungen haben, dass, wenn wir schrittweise von einer Gruppe zur anderen gehen, wir nicht eher wieder an den Ausgangspunkt gelangen, als bis sämtliche Gruppen eingeschlossen sind. Nennen wir nun N die Zahl der Leiter um den Anker, b die Zahl der Leiter in einem Element, so giebt uns N/b die halbe Zahl der Gruppen; wenn wir diese Zahl um 1 vermehren oder vermindern, erhalten wir einen passenden Werth für die Gruppenzahl bei zweipoligen Maschinen. Bei Sehnwickelungen kann, wie wir schon gesehen haben, die Gruppenzahl um mehr als 1 von dem Werthe N/b abweichen, ebenso bei Mehrfach-Wickelungen, wie wir später (S. 254) sehen werden. Bezeichnen wir diese zu addirende oder zu subtrahirende Zahl mit a , so ist eine passende Gruppenzahl für Trommelwickelungen $= N/b \mp a$.

Wenn nun die Dynamomaschine p Polpaare besitzt, kann der Theil der Wickelung, der sich gegenüber einem Polpaare befindet, so angesehen werden, als wären diese beiden Pole allein vorhanden, mit dem einzigen Unterschiede, dass die Leiter dieses Theiles mit den Leitern des dem folgenden Polpaare gegenüberliegenden Wickelungstheiles verbunden werden müssen, statt mit den gleichliegenden Leitern desselben Theiles. Wenn wir daher den oben für die Gruppenzahl gegebenen Ausdruck durch p theilen, erhalten wir die von Arnold für die Gruppenzahl vielpoliger Trommelwickelungen gegebene Formel

$$y = \frac{1}{p} \left(\frac{N}{b} \mp a \right), \text{ oder } N = b(py \pm a).$$

Bei vielpoligen Trommelwickelungen hat a eine bestimmte Bedeutung. Sehen wir aus Gründen der Einfachheit von Sehnwickelungen und Vielfachwickelungen ab, so bezeichnet a die Zahl der Stromverzweigungen durch die Wickelungssätze, welche miteinander parallel verbunden sind. Die Zahl der neutralen Punkte ist stets $= 2a$. Die Zahl y muss mit Rücksicht auf die Zahl der Gruppen s stets eine Primzahl sein, weil sonst die Wickelung nicht geschlossen in sich zurückkehrt. Besitzen die beiden Zahlen einen gemeinsamen Factor (z. B. $s = 36$, $y = 27$, gemeinsamer Factor 3), so sind so viele unabhängige Kreise vorhanden, als der gemeinsame Factor angiebt.

In Folgendem wenden wir die Formeln an.

I. Parallelschaltung. Wie wir für den gewöhnlichen Ringanker in einem vierpoligen Felde ermittelten, waren vier Reihen

von $\frac{1}{4}N$ Leitern zu einander parallel geschaltet. Wenn soviel Reihen parallel geschaltet werden, als Pole um den Anker angeordnet sind, nennen wir dies einfache Parallelschaltung. In einem zwölfpoligen Felde sind zwölf Reihen zu je $\frac{1}{12}N$ parallel geschaltet. Wie wir ferner bei dem vierpoligen Ring mit Spiralwicklung ersehen haben, lässt sich jedes Paar von Reihen als besondere zweipolige Ankerwicklung betrachten. Auch für Trommelanker trifft dies zu, wenn eine Schleifenwicklung vorhanden ist, nicht aber für eine Wellenwicklung. Wir haben daher bei der Anwendung der Formel zwei Fälle zu unterscheiden:

- a) Für Spiralwicklung oder Schleifenwicklung wird in der Formel $p = 1$ und $a = 1$. Man wende die Formel auf einen Satz von Leitern an, der zwischen zwei gleichnamigen Polen liegt.
- b) Für Wellenwicklung ist $a = p$, d. h. es giebt so viele Stromverzweigungen, als Polpaare vorhanden sind. In einer sechspoligen Maschine ist $p = 3$, der Strom theilt sich an drei Punkten (den drei negativen Bürsten) und fließt auf sechs Wegen zu den drei positiven Bürsten (oder zu den Querverbindungen, die zu den positiven Bürsten führen).

II. Reihenschaltung. Da der Strom sich nur einmal verzweigt, so ist $a = 1$, wie man auch die Wicklung anfertigen mag. Bei zweipoligen Maschinen ist die Reihenschaltung und die Parallelschaltung gleich, es liegen zwei Reihen von Windungen parallel zu einander; die Wicklung kann entweder eine Schleifen- oder eine Wellenwicklung sein, für Ringankermaschinen lässt sich auch eine Spiralwicklung verwenden. Für vierpolige Maschinen gilt das Gleiche. Für Maschinen mit mehr als vier Polen ist es indessen nur angängig, die Reihenschaltung mit Wellenwicklung auszuführen.

III. Gemischte Schaltung. Es sind verschiedene aus Schleifen- oder aus Wellenwicklungen bestehende gemischte Wicklungen möglich, entsprechend den Fällen, in denen $a > 1$ oder $a \leq p$ ist.

Als Beispiele mögen folgende Fälle dienen:

Für die Ringwicklung in der Fig. 34 sei $N = 32$, $p = 1$, $b = 4$, $s = 8$, die Zahl der Stromabgeberstäbe $c = 8$. Dann ist $y = 7$ oder 9. Der Ring besitzt aber nur acht Abtheilungen, von denen also von irgend einer Abtheilung an gerechnet die siebente und neunte solche Abtheilungen sind, die auf jeder Seite der betreffenden Abtheilung liegen.

In der Trommelwicklung der Fig. 69 sei $N = 32$, $p = 1$, $b = 2$ (weil jedes Element der Wicklung von Stab zu Stab des

Stromabgebers zwei wirksame Leiter enthält), $s = 16$, $c = 16$. Dann ist $y = 15$ oder 17 . Die erstere Zahl kann man auf die vordere Lage der Verbindungen (Nr. 1 mit Nr. 16), die letztere auf die unterhalb liegende Verbindung (Nr. 2 mit Nr. 19) beziehen.

Ein weiteres Beispiel liefert die besondere Ringwicklung von Wodicka (Fig. 172), in der jede Abtheilung mit einer gegenüberliegenden hintereinander verbunden ist, so dass die Zahl der Stäbe des Stromabgebers halb so gross ist wie die Zahl der Abtheilungen.

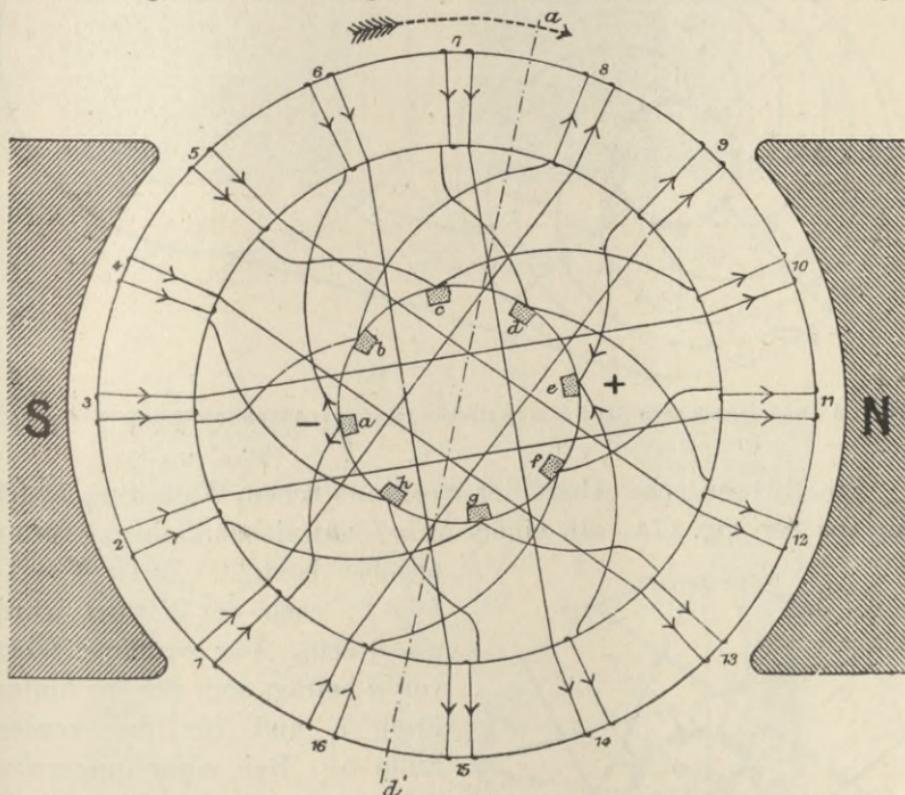


Fig. 172. Ringwicklung mit Reihenschaltung der gegenüberliegenden Rollen.

Hier besteht jedes Element der Wicklung aus zwei Abtheilungen, die wirksame Leiter enthalten; es ist $b = 4$, $N = 32$, $s = 16$, $p = 1$, y kann sonach entweder 9 oder 7 sein.

Trommelwickelungen.

Die Fig. 173 zeigt einen achttheiligen Anker mit einer Trommelwicklung. Wie in allen älteren Trommelankern von Siemens liegen die Wicklungen in zwei Lagen, jede Abtheilung ist nach einem Durchmesser gewickelt. Beginnt man bei dem Stabe 1 des Stromabgebers, so gelangen wir nach $1'$, dann am Anker entlang quer über das Ende hinweg und wieder nach vorn zu $1''$ und nachdem

eine genügende Zahl von Windungen zur Bildung einer Abtheilung aufgelegt worden ist, mittels einer spiraligen Verbindung zum Stabe 2 des Stromabgebers.

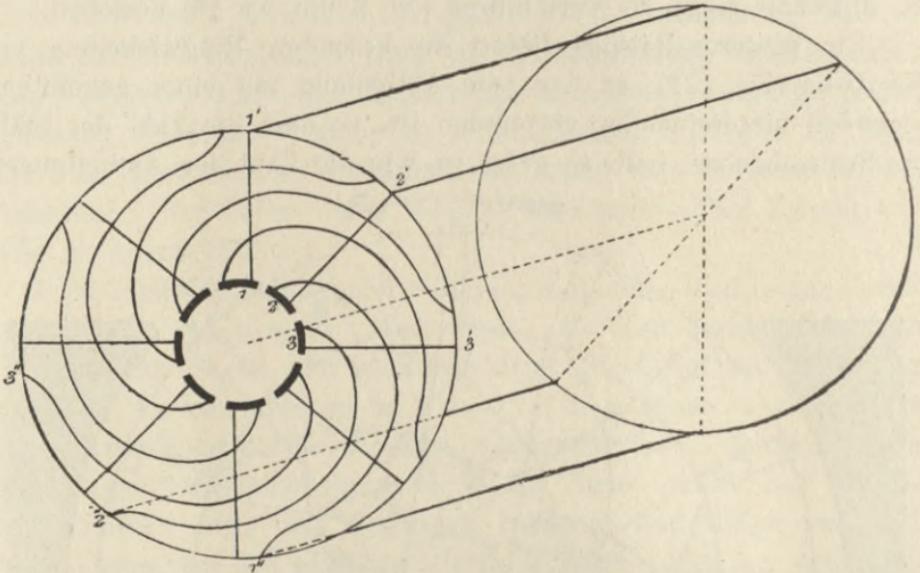


Fig. 173. Endverbindungen der Siemens'schen (Hefner-Alteneck'schen) Wickelung.

Die Edison'sche Abart der Siemens'schen Wickelung ersieht man aus der Fig. 174, die einen Anker mit siebentheiligem Stromabgeber darstellt. Es ist $N = 14$,

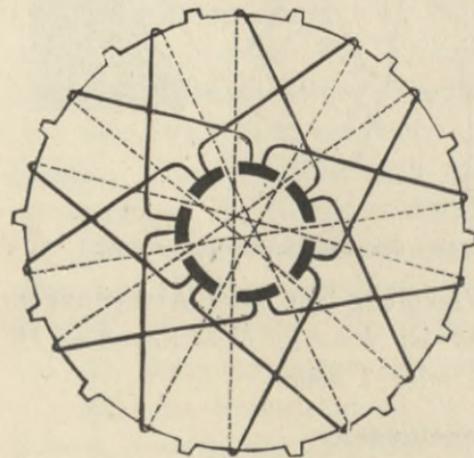


Fig. 174.
Endverbindungen der Edison'schen Wickelung.

$b = 2$, nach der Formel würde $y = 6$ sein. Der wirkliche Werth von y beträgt aber für das hintere Ende 7 und für das vordere Ende 5. Bei einer ungeraden Zahl von Abtheilungen geht die Stromwendung in zweipoligen Maschinen nicht gleichzeitig an beiden Bürsten, sondern abwechselnd vor sich. Das eingehende Studium der Trommelwicklung ist von Bedeutung, es finden sich daher auch in

Folgendem verschiedene Darstellungen von Trommelwickelungen.

Aus den Fig. 175 und 176 ersieht man eine rechtsgängige Wickelung nach Siemens'scher Art mit einem achttheiligen Stromabgeber. Jede Abtheilung enthält eine Windung, d. h. 16 um die

Trommel gelegte Leiter. Die Verbindungsstücke am vorderen Ende bestehen aus geraden und aus spiraligen Leitern, die sich kreuzen. Die Verbindungen am anderen Ende des Ankers sind nur mittels

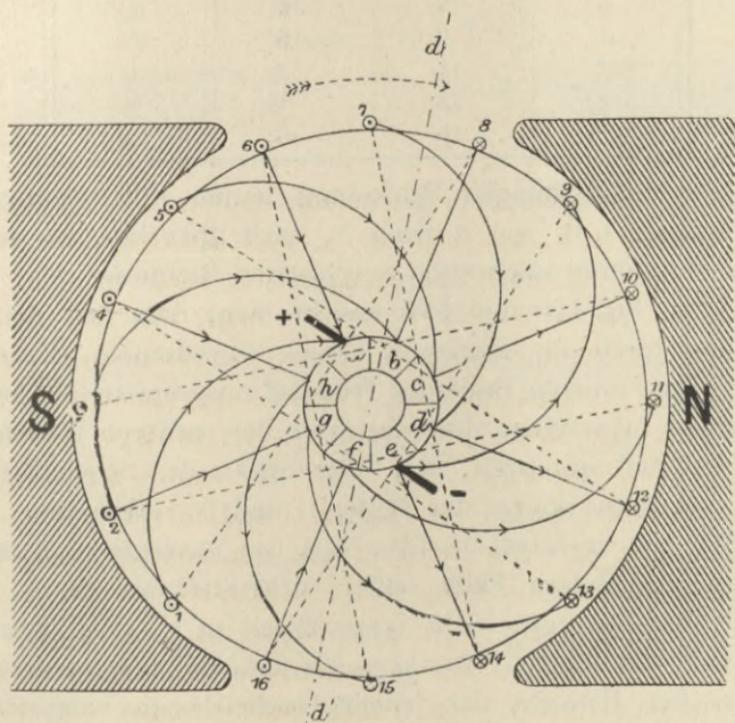
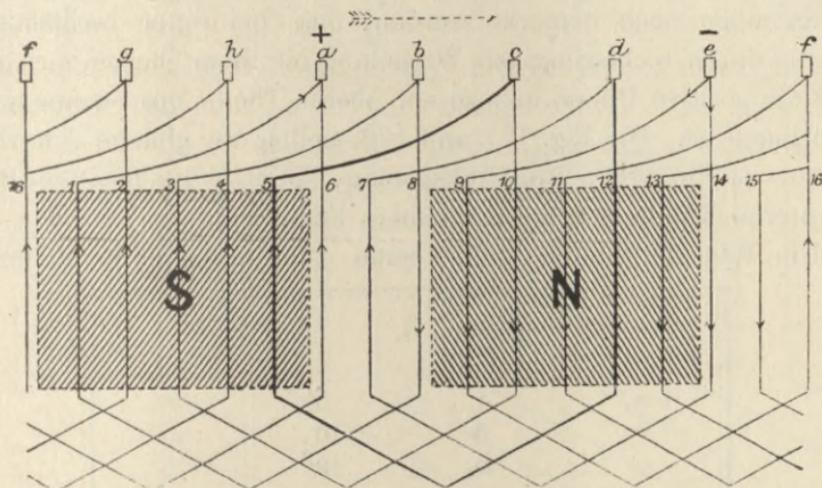


Fig. 175 und 176. Abwicklung und Endansicht einer rechtsgängigen Siemens'schen Schleifenwicklung.

der punktierten Linien angedeutet. Jedes Element der Wicklung liegt in derselben Weise wie $e - 5 - 12 - d$, die Anordnung ist eine einfache Wellenwicklung. Die rückwärts liegenden Verbindungsstücke greifen über sieben Zwischenräume der Leiter, jede

solche Verbindung schneidet stets die Zahl $\frac{1}{2}N$ der Leiter auf dem Umfange ab; die vorderen Verbindungen lassen fünf Zwischenräume zwischen sich und schneiden auf dem Halbumfange drei Leiter ab.

Es möge noch bemerkt werden, dass bei einer rechtsläufigen Drehung dieser rechtsgängigen Wickelung in einem ebenso gerichteten Felde die positive Bürste nahezu am oberen Theile des Stromabgebers anzubringen ist. Die Fig. 177 und 178 stellen die gleiche Anordnung dar, nur ist die Wickelung linksgängig, so dass die positive Bürste am unteren Theile des Stromabgebers liegt.

Die Wickelungstafel ist für beide Anordnungen die gleiche.

V	R		V
+ a	1	8	b
b	3	10	c
c	5	12	d
d	7	14	e
- e	9	16	f
f	11	2	g
g	13	4	h
h	15	6	a

In der rechtsgängigen Wickelung laufen die spiralgigen Verbindungsstücke, z. B. von *a* nach 1, nach links hin, in der linksgängigen Wickelung nach entgegengesetzter Richtung.

Aus den Fig. 175 und 177 ersieht man, dass bei den Wickelungen das durch die stärkeren Linien angedeutete Element der Wickelung am vorderen Ende der Trommel unsymmetrisch liegt. Dies rührt von der Anwendung der zwei Arten der vorderen Verbindungen, der geraden und spiralgigen, her. Der Stab *a* des Stromabgebers ist mit den vorderen Enden der Leiter 1 und 6 verbunden. In dem einem Falle ist er schief herüber mit der entgegengesetzten Nr. 6 verbunden, im andern Falle schief rückwärts mit Nr. 1. Warum liegen die Verbindungen nicht symmetrisch zu beiden Leitern? Die Fig. 179 und 180 zeigen eine symmetrische Schleifenwickelung, die in elektrischer Hinsicht der früher beschriebenen entspricht, und für die auch dieselbe Wickelungstafel gilt. Die Vortheile derselben sind doppelte: die Verbindungsstücke am vorderen Ende sind sämmtlich gleich (was bei der Herstellung des Ankers von Bedeutung ist), sie bestehen aus kurzen, spiralgigen Stücken; die Bürsten liegen ferner ziemlich in einem horizontalen Durchmesser, so dass sie bequemer zugänglich sind. Die am hinteren Theile des Ankers liegenden

Verbindungsstücke sind ebenso wie die bereits früher beschriebenen; sie reichen über längere Sehnen als die vorderen Verbindungsstücke.

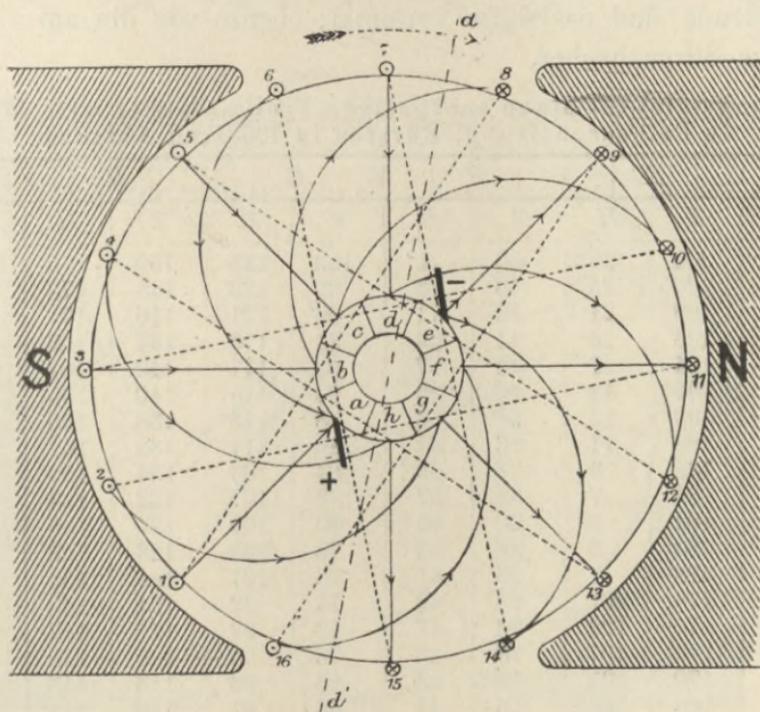
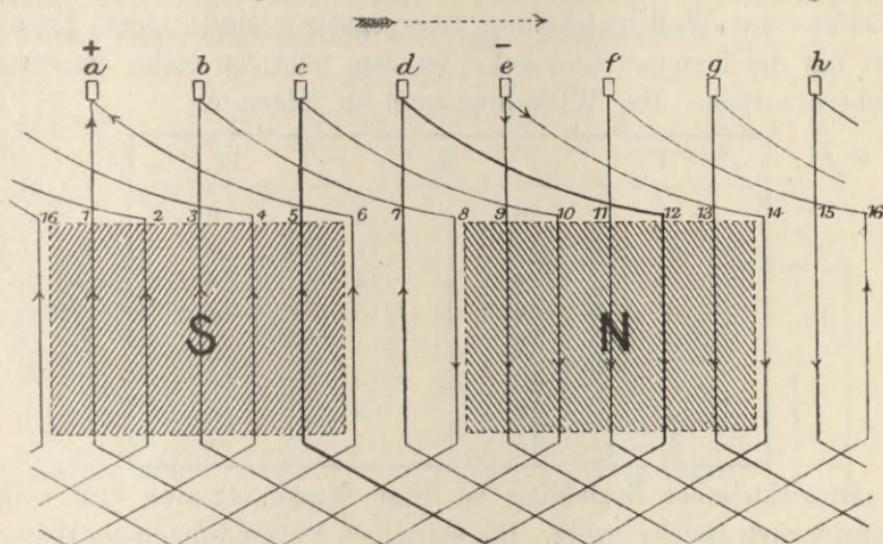


Fig. 177 und 178. Abwicklung und Endansicht einer linksgängigen Siemens'schen Schleifenwicklung.

Zur Herbeiführung der äussersten Symmetrie in der Wicklung müssten die an dem vorderen und hinteren Ende liegenden Verbindungsstücke gleich gemacht werden. Theoretisch ist $y=7$ oder $=9$. Um dies zu erreichen, verbinde man 1 mit 8 an einem Ende der

Trommel und mit 10 am anderen Ende. Das Ergebniss ist aus den Fig. 181 und 182 ersichtlich. Es zeigt sich auch, dass wir von der Schleifen- zur Wellenwicklung übergegangen sind; jedes Element führt um die Trommel und kehrt zu dem nächsten Stabe des Stromabgebers zurück. Die Wickelungstafel ist folgende:

V		R		V	
+ a	16	9	b		
b	2	11	c		
c	4	13	d		
d	6	15	e		
- e	8	1	f		
f	10	3	g		
g	12	5	h		
h	14	7	a		

In elektrischer Beziehung ist diese Wickelung den drei vorher beschriebenen gleichwerthig. Die spiralgigen Verbindungen am hinteren Trommelende sind paarweise vereinigt, ebenso wie die am vorderen Ende am Stromabgeber.

Wickelungstafel für einen achtpoligen Trommelanker mit 202 Stäben in Reihenschaltung; Bürsten in 135 Grad Abstand.

V	R	V	R	V	R	V	R	V
Z	H	Z	H	Z	H	Z	H	
202	25	50	75	100	125	150	175	
200	23	48	73	98	123	148	173	
198	21	46	71	96	121	146	171	
196	19	44	69	94	119	144	169	
194	17	42	67	92	117	142	167	
192	15	40	65	90	115	140	165	
190	13	38	63	88	113	138	163	
188	11	36	61	86	111	136	161	
186	9	34	59	84	109	134	159	
184	7	32	57	82	107	132	157	
182	5	30	55	80	105	130	155	
180	3	28	53	78	103	128	153	
178	1	26	51	76	101	126	151	
176	201	24	49	74	99	124	149	
174	199	22	47	72	97	122	147	
172	197	20	45	70	95	120	145	
170	195	18	43	68	93	118	143	
168	193	16	41	66	91	116	141	
166	191	14	39	64	89	114	139	
164	189	12	37	62	87	112	137	
162	187	10	35	60	85	110	135	
160	185	8	33	58	83	108	133	
158	183	6	31	56	81	106	131	
156	181	4	29	54	79	104	129	
154	179	2	27	52	77	102	127	
152	177	202						

Die Fig. 183 und 184 stellen eine aus zwei Lagen bestehende Wicklung mit 24 Leitern dar; um die Hälfte der Ankerwicklung von *a* bis *g* herzustellen, wird eine Lage aufgewickelt.

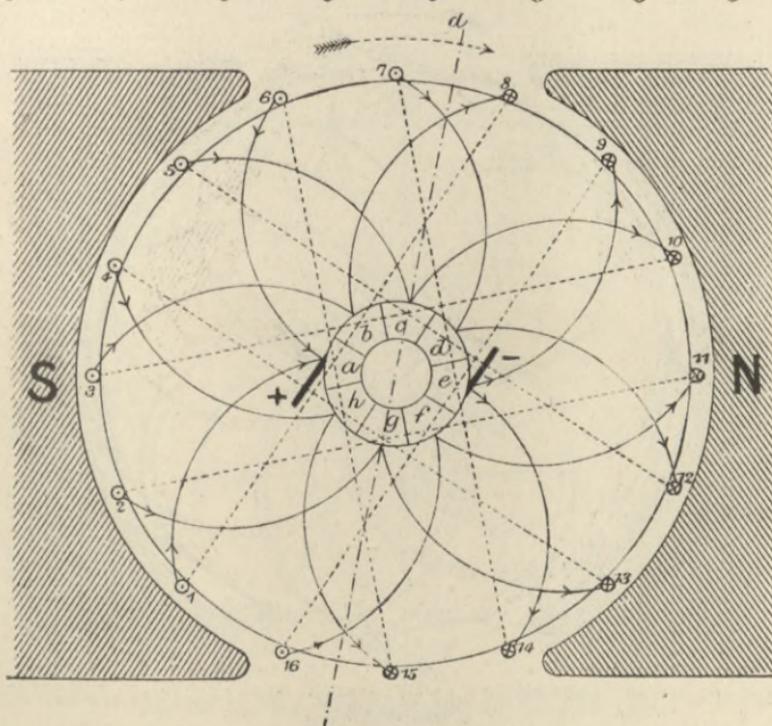
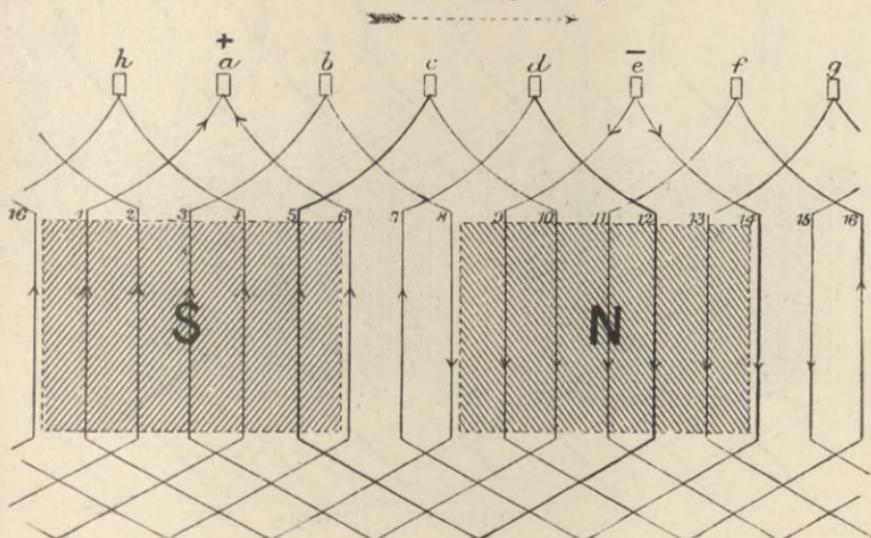


Fig. 179 und 180. Abwicklung und Endansicht der zweipoligen Schleifenwicklung.

Vielpolige Trommeln. Die Wicklung vielpoliger Anker mit Reihenschaltung wurde von Perry erfunden¹⁾. Auf Trommel-

1) Englischtes Patent [1882] Nr. 3036.

anker wurde sie von Paris und Scott¹⁾, sowie von Kapp angewendet.

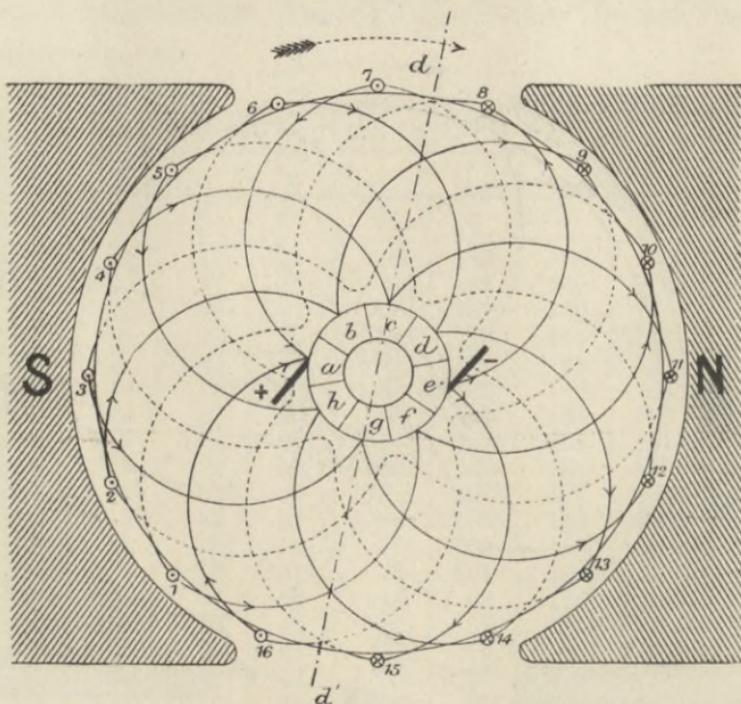
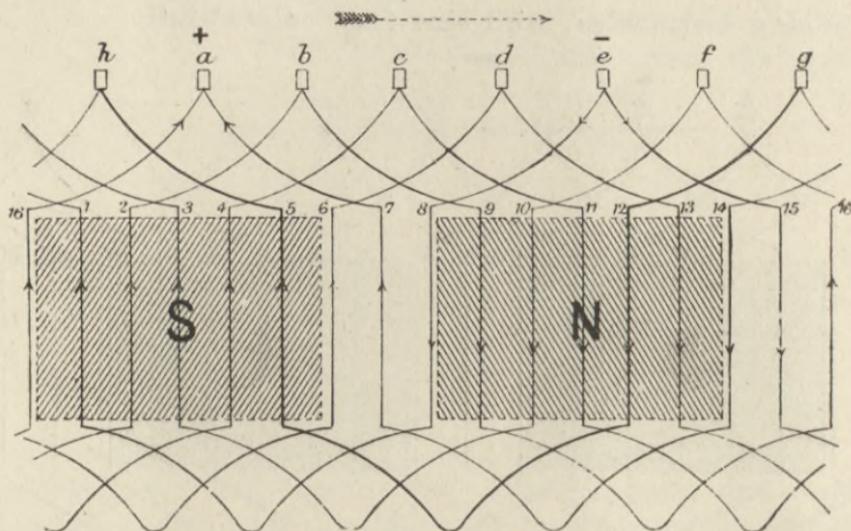


Fig. 181 und 182. Abwicklung und Endansicht einer zweipoligen symmetrischen Wellenwicklung.

Für vielpolige Maschinen lässt sich folgende Regel aufstellen: Wenn eine Reihengruppirung (für hohe Spannung) gewünscht wird,

1) Englischcs Patent [1884] Nr. 4683.

so muss y eine ungerade Zahl sein, und die gesammte Zahl der Leiter muss gleich der y fachen Polzahl ± 2 sein.

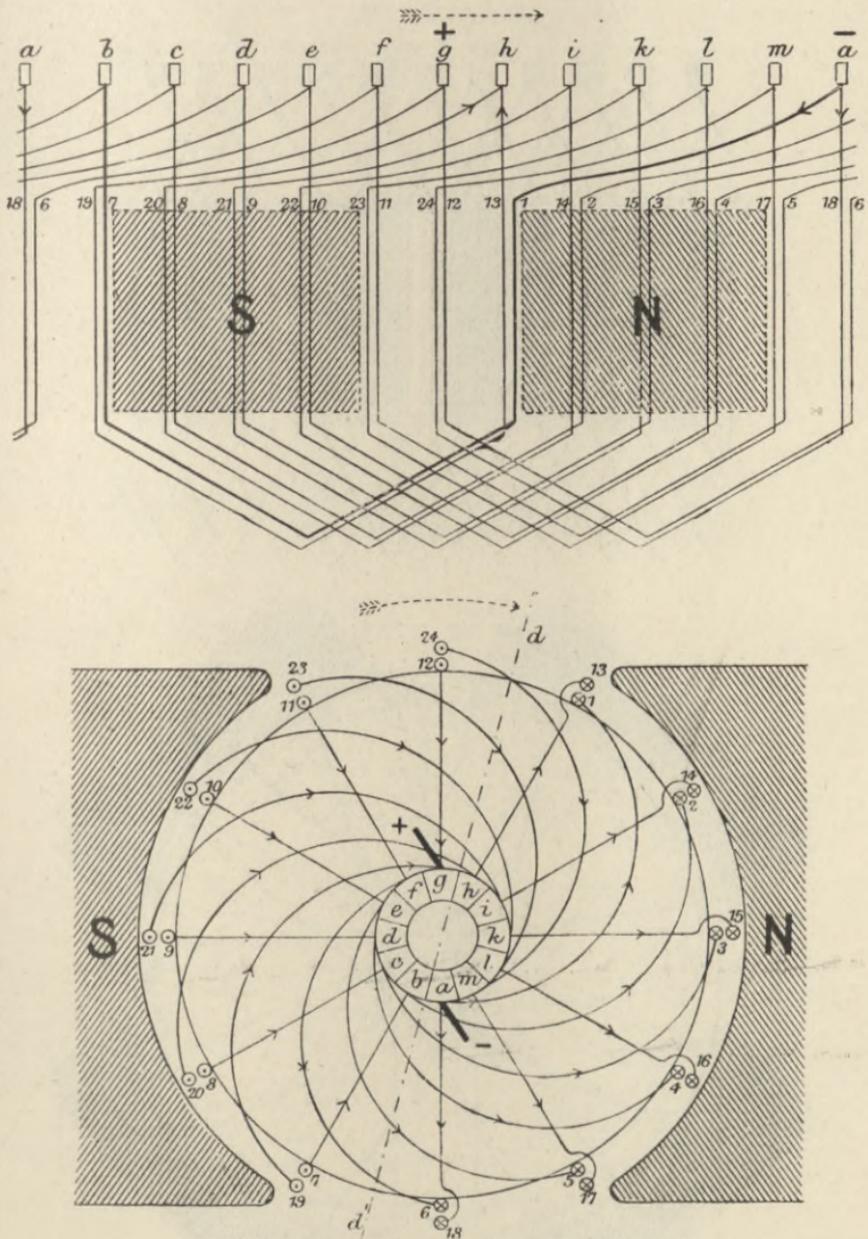


Fig 183 und 184. Trommelwicklung mit zwei Lagen.

Nehmen wir z. B. für eine sechspolige Maschine $y = 15$ an, so muss die Zahl der Leiter 88 oder 92 betragen. Vorstehend (S. 248) findet sich eine von Kapp berechnete Wicklungstafel für eine achtpolige Maschine, für die $y = 25$ ist.

Wenn in vielpoligen Maschinen die Zahl der Abtheilungen ein genaues Vielfache, ungerade oder gerade, von p ist, so wird die

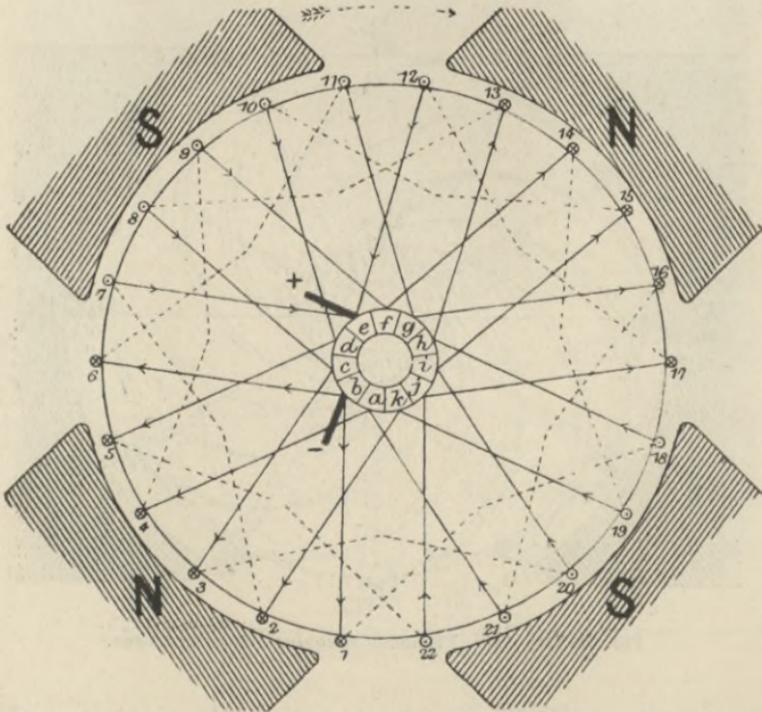
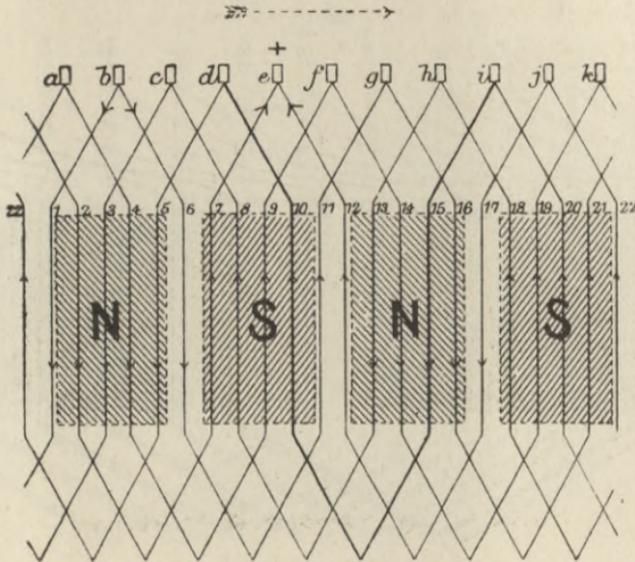


Fig. 185 und 186. Vielpolige Trommelwicklung mit Reihenschaltung.

Schaltung parallel. Bei einem ungeraden Vielfachen erfolgt die Stromwendung nicht gleichzeitig an sämtlichen Bürsten, sondern

abwechselnd an den $+$ und den $-$ Bürsten, ebenso wie die abwechselnde Stromwendung in einer zweipoligen Maschine, deren

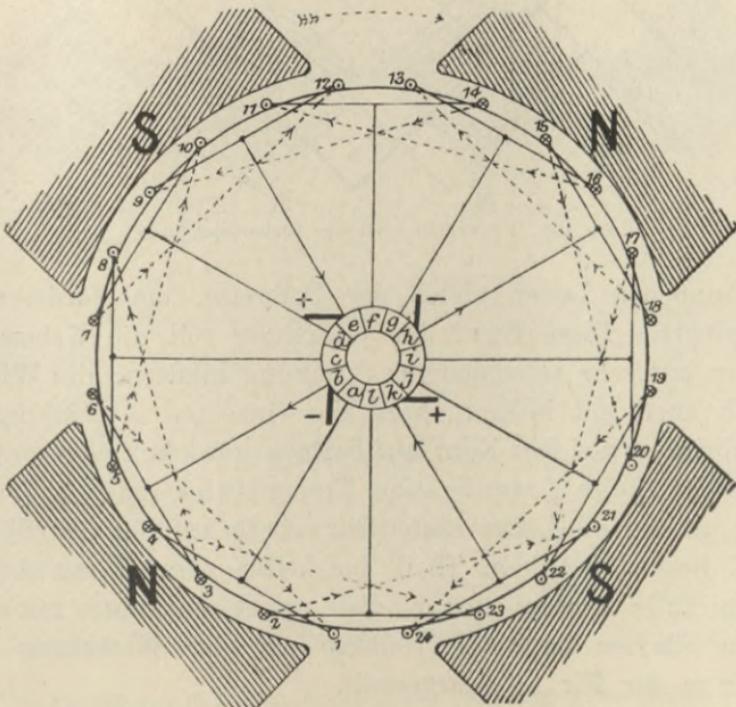
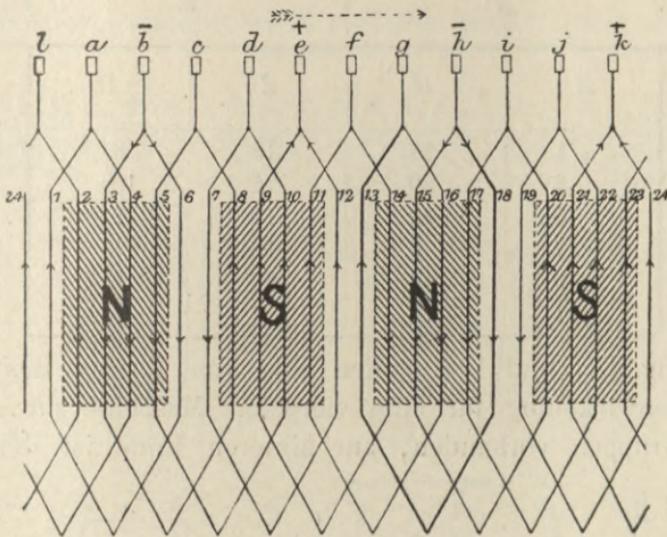


Fig. 187 und 188. Thury's Anker (vierpolige Schleifenwicklung).

Wicklungsabtheilungen eine ungerade Zahl bilden. Die Fig. 185 und 186 zeigen die Verbindungen in einer vierpoligen Trommelwicklung mit 22 Leitern, y ist hier = 5.

Die Wickelungstafel ist folgende:

V	R	V	R	V
Z	H	Z	H	
1	18	13	8	
3	20	15	10	
5	22	17	12 +	
+ 7	2	19	14	
9	4	21	16	
11	6	1		

Die Fig. 187 und 188 stellen eine von Thury benutzte einfache Wellenwicklung für eine vierpolige Maschine dar. Es sind parallele Gruppen vorhanden, am hinteren Ende ist der Abstand

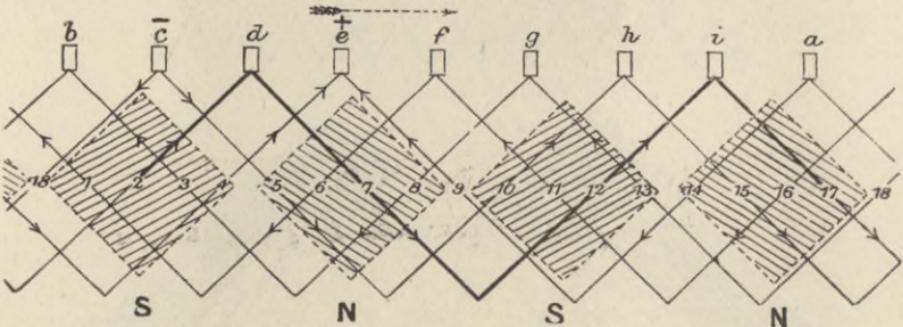


Fig. 189. Fritsche's schräge Wellenwicklung.

der verbundenen Leiter gleich der Polbreite, am vorderen Ende noch geringer. Diese Form der Wicklung soll die Ueberdeckung der Leiter mit sehr verschiedener Spannung hindern; die Wicklung lässt sich auch gut isoliren, weil die einzelnen Abtheilungen vor dem Aufbringen auf den Kern auf Formen gewickelt werden können.

Von Fritsche¹⁾ wurde eine Trommelwicklung in Vorschlag gebracht, in der die Leiter sämtlich schräg auf der Oberfläche der Trommel liegen und kein Theil der Leiter parallel zur Achse ist. In diesem Falle werden auch die Pole des Feldmagnetes mit diagonal liegenden Flächen hergestellt. Diese Art der Wicklung ist abgewickelt in der Fig. 189 dargestellt.

Man vergleiche die Zeichnung mit der elektrisch gleichwerthigen Einrichtung in der Fig. 201. Auch Hopkinson und Bradley haben vielpolige Trommelwicklungen angegeben.

1) Die Gleichstrom-Dynamomaschinen, Berlin 1889.

Mehrfach-Wickelungen.

Bei Dynamomaschinen, welche so starke Ströme liefern sollen, dass deren Stromwendung Schwierigkeiten bietet, ist es zweckmässig,

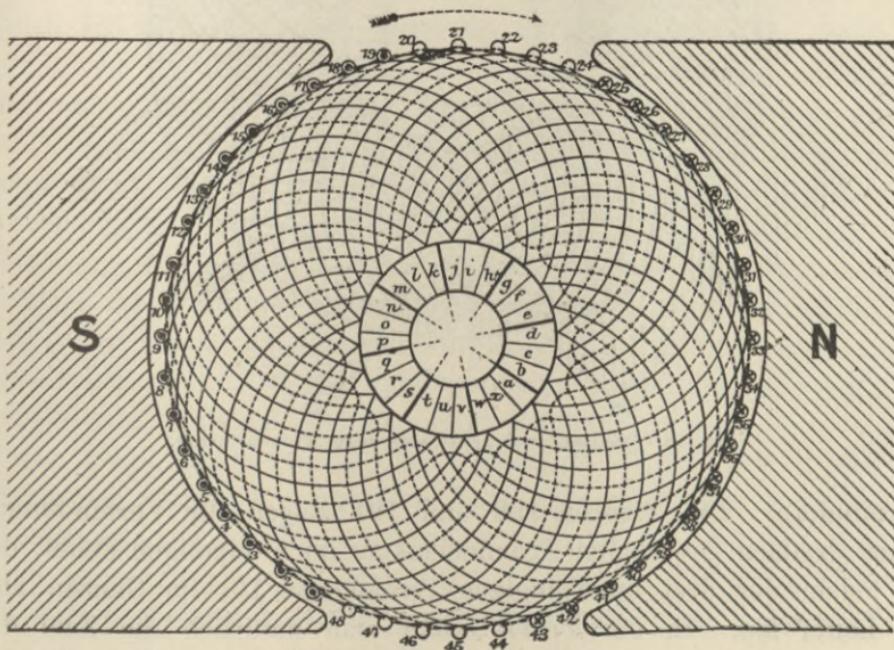
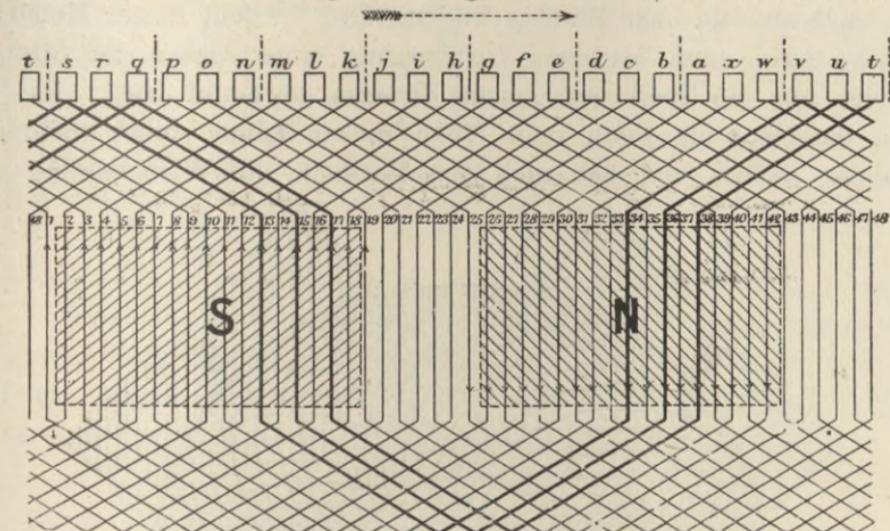


Fig. 190 und 191. Dreifach gewickelter zweipoliger Trommelanker.

die Wickelung in zwei oder mehr völlig voneinander getrennte Theile zu zerlegen, welche jeder mit einem besonderen Satz von Stromwenderstäben verbunden sind. Alle Sätze sind aber so zu einem gemeinsamen Stromwender vereinigt, dass jedem Stab eines

Satzes ein Stab des nächsten Satzes folgt. Der Strom wird von einem Paar breiter Bürsten oder einem Satz von Bürsten aufgesammelt, welche parallel geschaltet sind, so dass sie in Wirklichkeit auch nur ein Paar Bürsten bilden. Der Vortheil dieser Methode besteht darin, dass bei dem Vorübergang eines Stabes am Stromwender nur ein Theil des ganzen Stromes gewendet wird. Es ist ganz dasselbe, als wenn man einen dicken Leiter durch mehrere dünnere ersetzt, und hat auch den Vortheil, die Wirbelströme zu

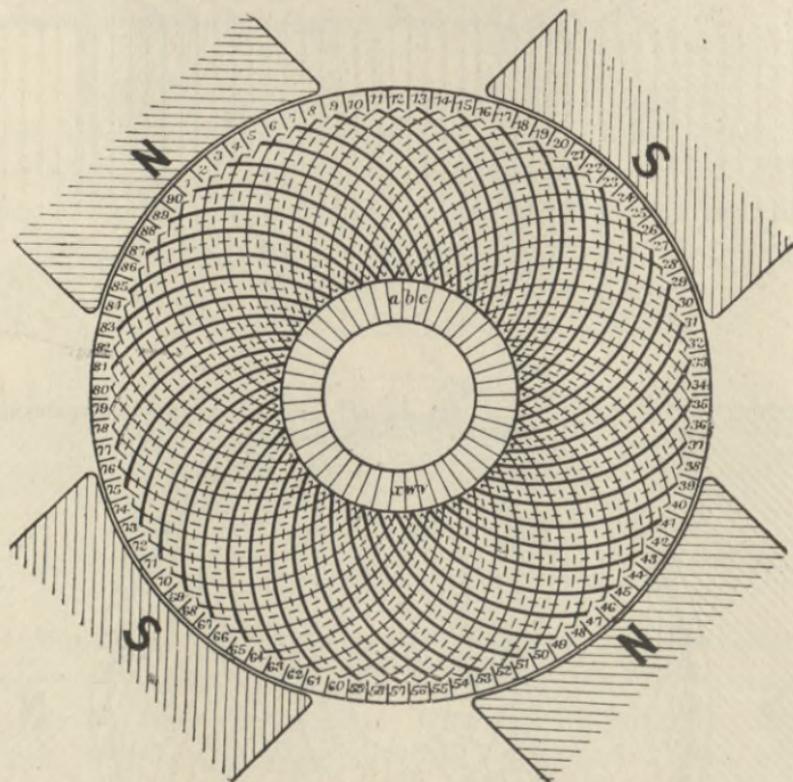


Fig. 192. Dreifach gewickelter vierpoliger Trommelanker.

vermindern. Die Figuren 190 und 191 zeigen die Verbindungen eines dreifach gewickelten Trommelankers im zweipoligen Felde, der in jedem der drei unabhängigen Stromkreise 16, im Ganzen also 48 Leiter hat. In der Praxis wählt man natürlich die Zahl der Leiter grösser. Jeder der drei Kreise ist wie ein gewöhnlicher Trommelanker gewickelt und mit acht Stromwenderstäben verbunden. Zwischen den drei Wickelungen sind weiter keine Verbindungen vorhanden als durch die Bürsten, welche so breit sind, dass sie drei nebeneinander liegende Stäbe überdecken und dadurch die drei Kreise parallel schalten.

Die Wickelungstabelle für diesen Anker ist die folgende:

Stromkreis <i>a</i>			Stromkreis <i>b</i>			Stromkreis <i>c</i>					
<i>V</i>	<i>R</i>	<i>V</i>	<i>V</i>	<i>R</i>	<i>V</i>	<i>V</i>	<i>R</i>	<i>V</i>			
<i>a</i>	1	22	<i>d</i>	<i>b</i>	47	20	<i>e</i>	<i>c</i>	45	18	<i>f</i>
<i>d</i>	43	16	<i>g</i>	<i>e</i>	41	14	<i>h</i>	<i>f</i>	39	12	<i>i</i>
<i>g</i>	37	10	<i>j</i>	<i>h</i>	35	8	<i>k</i>	<i>i</i>	33	6	<i>l</i>
<i>j</i>	31	4	<i>m</i>	<i>k</i>	29	2	<i>n</i>	<i>l</i>	27	48	<i>o</i>
<i>m</i>	25	46	<i>p</i>	<i>n</i>	23	44	<i>q</i>	<i>o</i>	21	42	<i>r</i>
<i>p</i>	19	40	<i>s</i>	<i>q</i>	17	38	<i>t</i>	<i>r</i>	15	36	<i>u</i>
<i>s</i>	13	34	<i>v</i>	<i>t</i>	11	32	<i>w</i>	<i>u</i>	9	30	<i>x</i>
<i>v</i>	7	28	<i>a</i>	<i>w</i>	5	26	<i>b</i>	<i>x</i>	3	24	<i>c</i>

Fig. 192 zeigt die Verbindungen eines dreifach gewickelten Trommelankers für ein vierpoliges Feld. Die Verbindungen sind leicht verständlich auch ohne Wickelungstabelle. Es sind 90 Leiter in drei Stromkreisen vorhanden, die Gruppenzahl ist 21.

Vielpolige Ringwickelungen.

Dieselben wurden bereits auf Seite 235 erwähnt. Dort wurde auch schon nachgewiesen, dass ein in einem vielpoligen Felde befindlicher gewöhnlicher Ring an seinem Stromabgeber ebensoviele neutrale Punkte besitzt, als Pole vorhanden sind, und dass deshalb auch ebensoviele Bürsten als Pole erforderlich werden. Auf Tafel VIII sind zwei Ansichten der grossen vielpoligen Ringankermaschinen mit innenliegenden Feldmagneten dargestellt, welche ursprünglich von Siemens & Halske, Berlin, gebaut wurden. Die Ringwicklung besteht aus einzelnen Kupferleitern, welche zu einer einfachen fortlaufenden Spirale miteinander verbunden sind. Die äusseren Theile dieser Leiter sind tief und breit geformt, so dass sie gleichzeitig als Stromwender dienen können. Die Bürsten, an Zahl den inneren Polen gleich, schleifen auf der Aussenseite des Ringes; es sind abwechselnd positive und negative, im Ganzen zwölf Bürsten in gleichen Abständen voneinander angeordnet. Die sechs positiven Bürsten sind leitend miteinander verbunden, ebenso die negativen. Es sind in diesem Falle also zwölf Stromwege durch den Anker von der + zur — Seite des Stromkreises vorhanden.

Durch zwei verschiedene Methoden lässt sich jedoch die Zahl der Bürsten auf zwei verringern. Nach der einen Methode schaltet man die Reihen der Abtheilungen nebeneinander mit vielfachen Wegen durch den Ring, nach der andern Methode schaltet man sie hintereinander, mit nur zwei Wegen durch den Ring. Die

Fig. 193 zeigt die Art der Verringerung der Bürsten auf zwei, indem entgegengesetzte Wickelungen des Ringes miteinander verbunden werden. Diese Methode hat Mordey angegeben. Man kann sie als einfache Nebeneinanderschaltung jeder Spule mit der dem betreffenden

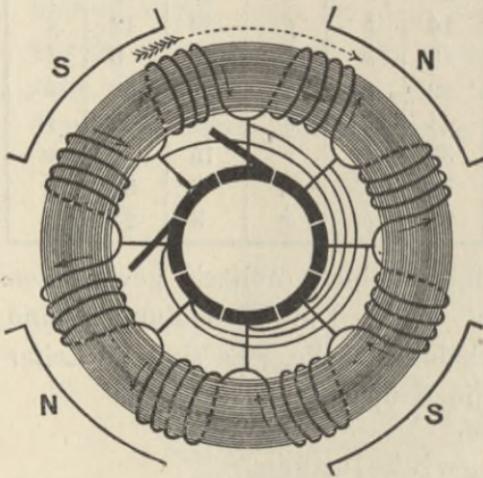


Fig. 193. Mordey's Methode zur Verbindung an vielpoligen Ringen (Parallele Verbindung).

Pol entgegengesetzt liegenden Spule ansehen. Die Anordnung scheint nicht symmetrisch zu sein, ist es aber doch.

Bei einer Maschine mit sechs Polen müsste man jede Spule mit den beiden, die 120 Grad auf jeder Seite von ihr abliegen, verbinden. Zu diesem Zwecke kann man verschiedene Wege einschlagen. Entweder wendet man spiralförmige Verbindungen an, oder man verbindet entsprechende Stäbe des Stromabgebers miteinander.

In der Victoria-Maschine der Brush Company (Fig. 283) erlaubt die Länge der Achse zwischen dem Ring und dem Strom-

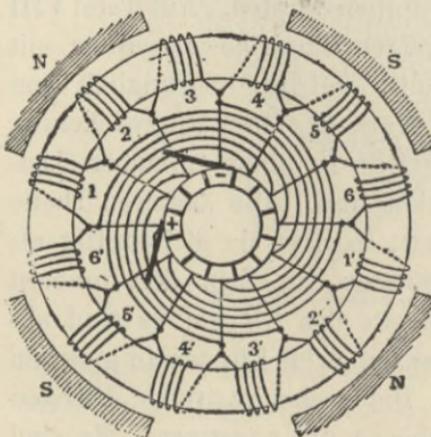


Fig. 194. Verbindungen am Anker der Victoria-Maschine.

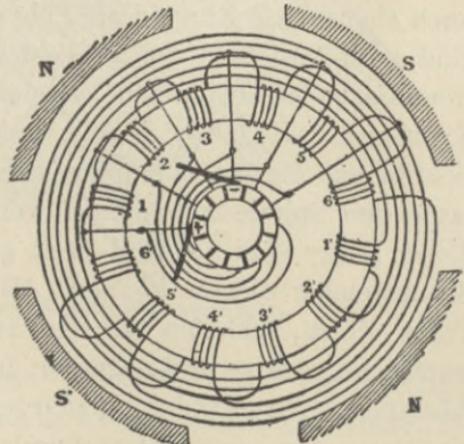


Fig. 195. Vierpoliger Ring. Reihenschaltung (zwei Reihen).

abgeber eine doppelte Querverbindung. Jede Vereinigung zweier benachbarter Abtheilungen wird durch einen Draht abwärts mit dem nächsten Stabe des Stromabgebers in Verbindung gebracht, ausserdem wird ein Verbindungsdraht herumgeführt zu dem Stabe an der entgegengesetzten Seite, wie die Figur 194 zeigt.

Derartige Maschinen mit Querverbindungen haben thatsächlich vier neutrale Punkte, die Bürsten nehmen indessen nur von zwei Punkten den Strom ab.

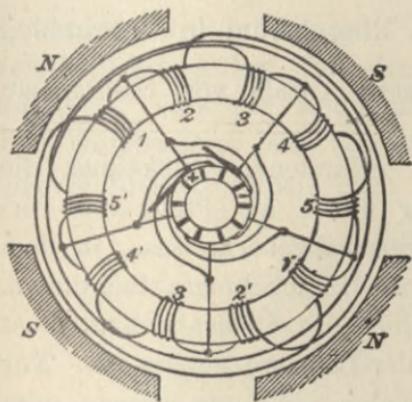


Fig. 196.

Vierpoliger Ring. Reihenschaltung.

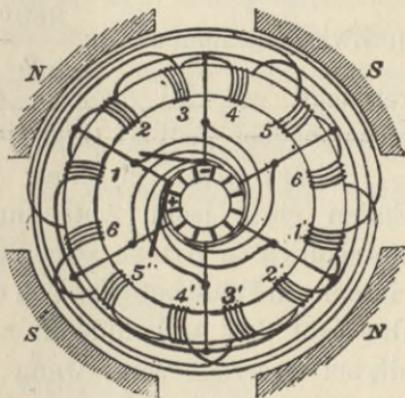


Fig. 197.

Um die Wickelungen hintereinander zu schalten und eine doppelte elektromotorische Kraft zu erhalten, lassen sich verschiedene Wege einschlagen.

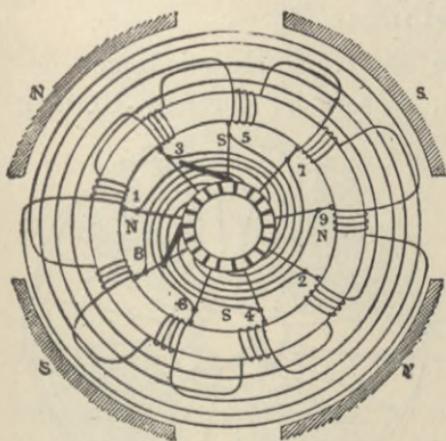


Fig. 198 Vielpoliger Ring.

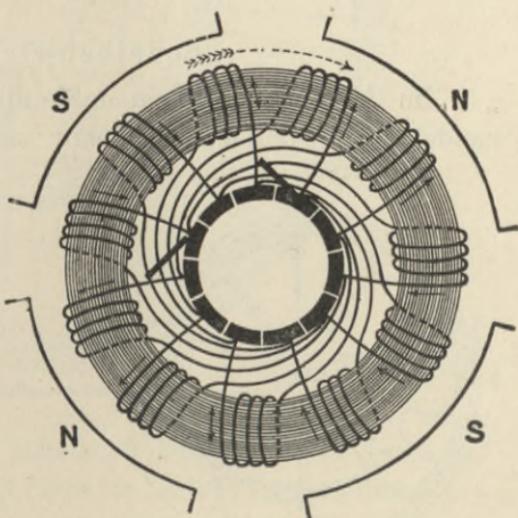


Fig. 199. Perry's Methode für Reihenschaltung.

Einer von ihnen wird durch die Figur 195 veranschaulicht. Während entgegengesetzt liegende Spulen in Reihe geschaltet sind, werden die Stäbe des Stromabgebers quer verbunden. Demnach sind zwei um 90 Grad voneinander abliegende Bürsten erforderlich.

Zwei andere, denselben Zweck erreichende Methoden sind in den Figuren 196 und 197 dargestellt. Hier sind die Verbindungen aber nicht symmetrisch, so dass die Widerstände der beiden Wege

(und also auch die entsprechenden Ströme) nicht stets gleich sein können.

Bei einer dritten Anordnung wird jede Spule mit p Stäben in Zwischenräumen von $\frac{360^\circ}{p}$ um den Ring herum in Verbindung gebracht, es wird dadurch eine grössere Anzahl von Stäben am Stromabgeber bedingt (Fig. 198).

Perry legt bei einer von ihm erfundenen Wickelung die Enden einer jeden Abtheilung in der durch die Figur 199 veranschaulichten Art an eine Sehne des Stromabgeberkreises. In dem vierpoligen Felde befindet sich ein Ring mit elf Wickelungsabtheilungen. Die Zahl der Abtheilungen und der Stäbe des Stromabgebers muss hierbei ungerade sein, wenn die Zahl der Polpaare gerade ist. Nur für Maschinen mit sechs oder zehn Polen kann sie gerade oder ungerade sein. Arnold giebt hierfür die Formel

$$S = py \pm 1.$$

Arnold hat in seinem bereits angeführten Werke zahlreiche andere Ringwickelungen von z. Th. complicirter Art beschrieben.

Scheibenwickelungen.

Im Allgemeinen kann man diese als Trommelwickelungen behandeln, die radial ausgedehnt sind, wobei der äussere Umfang

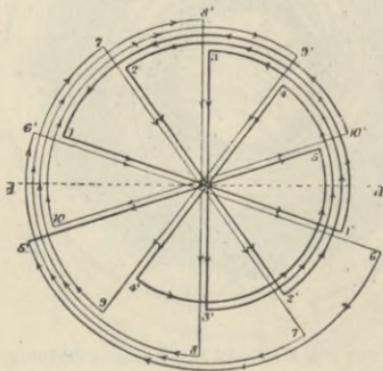


Fig. 200. Scheibenanker von Pacinotti.

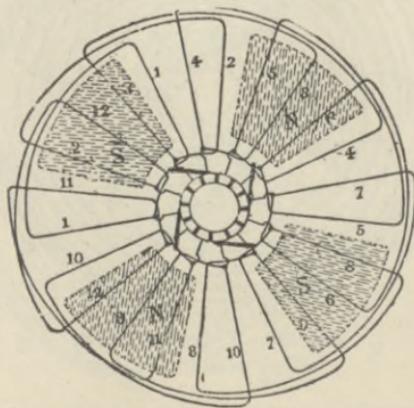


Fig. 201. Schleifenwicklung für Scheibenanker.

dem hinteren Ende der Trommel entspricht. Die älteste derartige Wickelung wurde im Jahre 1875 von Pacinotti erfunden (Fig. 200). Es ist eine Schleifenwicklung für ein zweipoliges Feld; der N -Pol liegt hinter dem oberen, der S -Pol hinter dem unteren Theil der Zeichnung. Das äussere Ende jedes radialen Leiters wird mittels

eines am Umfange liegenden Verbindungsstückes zu dem Ende eines andern radialen Leiters geführt.

In einer zweipoligen Maschine ist dies der dem entgegengesetzten Leiter zunächst befindliche. Das Schema der Figur 200 stellt einen zehnteiligen Anker dar, der aus 20 Leitern besteht. Sie sind so numerirt, dass die Reihenfolge der Verbindungen zu sehen ist. Der Durchmesser der Stromwendung ist mit dd bezeichnet, die Ströme fließen radial, nach Innen in der einen Hälfte und nach

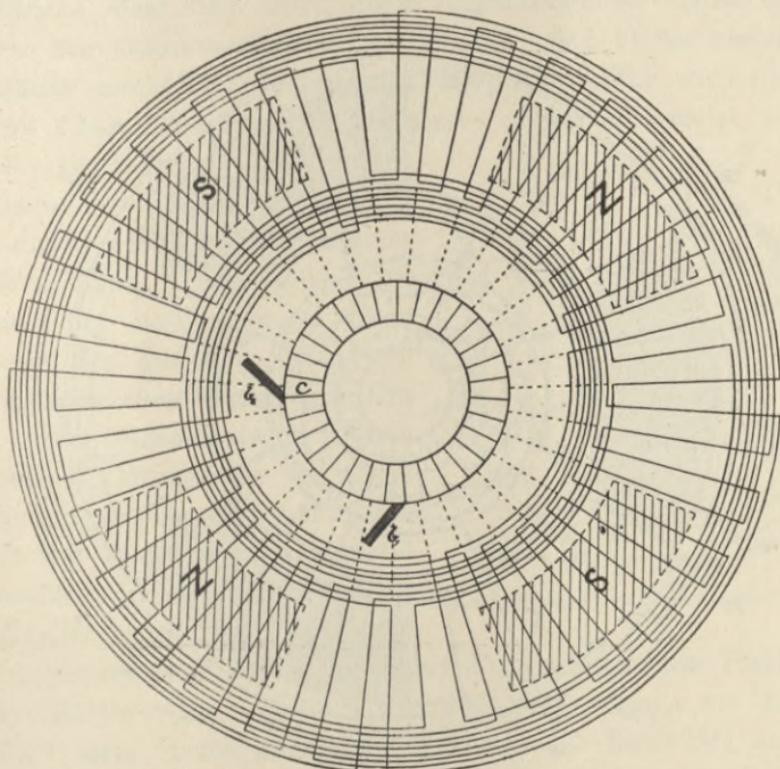


Fig. 202. Vierpolige Wellenwicklung (Müller).

Aussen in der andern Hälfte der Scheibe. Die Bauart der Versuchsmaschinen von Pacinotti findet sich in seiner Abhandlung beschrieben. Seitdem sind verschiedene Arten dieser Wicklungen angegeben worden.

Eine, mit der Pacinotti'schen gleichartige Schleifenwicklung für ein vierpoliges Feld ist in der Figur 201 abgebildet, sie ist unter dem Namen »Edison's neue Scheibenwicklung« bekannt. Die Scheibenanker von Hookham's Elektricitätsmessern sind ebenfalls mit Schleifenwicklung versehen. Bollmann und Müller haben eine vielpolige Scheibe mit Wellenwicklung angegeben. Figur 202 zeigt einen von Müller angegebenen Scheibenanker für

eine vierpolige Maschine, bei welcher die Leiter, welche in gleicher Lage zu den Polen sich befinden, in Reihen geschaltet sind. Die Bürsten stehen in diesem Falle in einem Winkel von 90 Grad zu einander.

Neuerdings wurden Scheibenanker von Desroziers und von Fritsche wieder eingeführt. Der erstere benutzt für eine sechspolige Maschine die in der Figur 203 dargestellte Wellenwicklung. Diese Art der Wickelung ist besonders von Arnoux (vergl. S. 230, Anm. 2) behandelt worden.

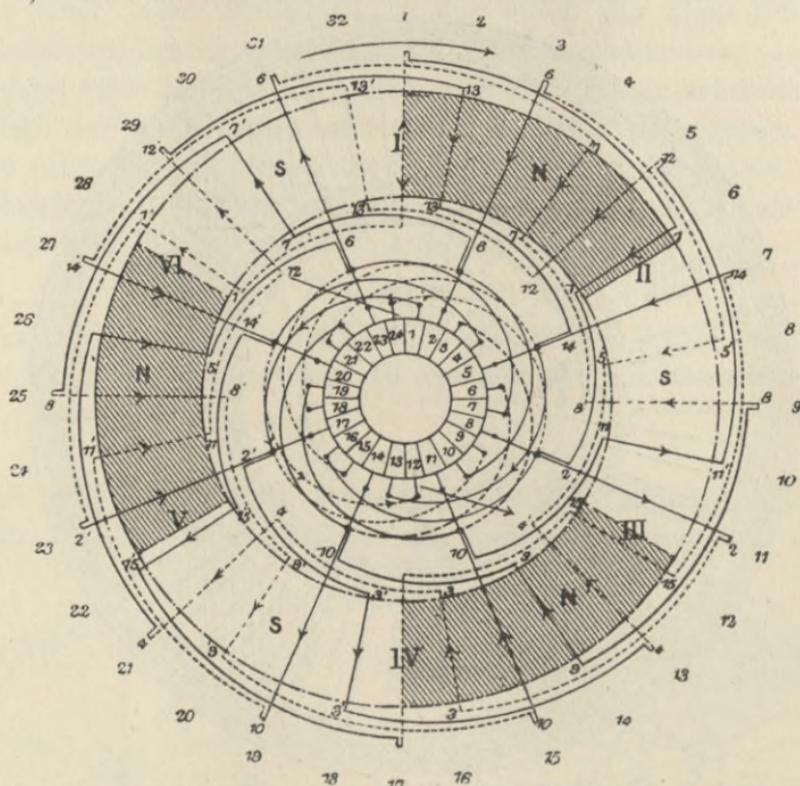


Fig. 203. Wickelung für einen sechspoligen Scheibenanker von Desroziers.

Fritsche verwendet ein mehrpoliges Feld wie in Figur 202 und radiale Metallstreifen als Leiter, welche wie in Figur 202 und 203 durch Verbinders hintereinander geschaltet werden. Die Ankerwicklung wird auf Tafel X dargestellt, aus welcher auch alle übrigen Einzelheiten der Maschinenconstruction zu ersehen sind. Die Ankerleiter sind an ihren äusseren Enden mit den Stäben des Stromabgebers am äusseren Umfange verbunden. Die Hauptschwierigkeit bei der Verwendung von Scheibenankern besteht darin, eine Bauart zu finden, welche mechanisch stark genug ist, dem Zug und Druck zu widerstehen. Desroziers hat sich viele Mühe gegeben,

die Schwierigkeit zu überwinden und hat Maschinen gebaut, welche eine grosse Verbreitung in Frankreich und seinen Colonien gefunden haben. Er hat zuerst gelehrt, dass die Ankerwicklung in zwei Theile zerlegt werden kann; d. h. nimmt man die radial angeordneten Leiter abwechselnd (z. B. die mit ungeraden Zahlen versehenen), so kann man sie nebst ihren Verbindungen in regelmässiger Figur in einer Ebene ohne störende Ueberkreuzungen aufbauen und auf diese Leiterebene eine aus den übrigen Leitern ähnlich aufgebaute Ebene so auflegen, dass die Verbindungen zusammenfallen. Diese brauchen alsdann nur zusammengelöthet zu werden, und bilden alsdann eine vollständig geschlossene Wicklung. Die Anordnung wird durch die Figuren 204, 205 und 206 erläutert. Figur 204 zeigt sechs in

Reihen geschaltete Leiter eines Scheibenankers für ein sechspoliges Feld; der Strom fliesst in denselben einwärts beim Vorübergehen an einem Pole, und auswärts beim Passiren des nächsten Poles von entgegengesetztem Vorzeichen. Um eine Anzahl dieser Leiter in Reihen aufzubauen, können sie mit ihren Verbindungen paarweise genommen und in der Weise, wie in Fig. 205 dargestellt, aufgebaut werden. Der mit *Rcdht* bezeichnete Theil entspricht genau dem ebenso in Figur 204 bezeichneten Theile.

Die andere Hälfte wird wie in Figur 206 angeordnet, wo der Theil *R'c'd'h't'* dem ebenso bezeichneten Theile der Figur 204 entspricht. In jeder dieser Leiterebenen werden die Enden an die Punkte 1, 2, 3 u. s. w. bis 32 herangeführt. Werden zwei solcher Scheiben mit den Stirnseiten einander gegenübergestellt, die gleichliegenden Enden miteinander verlöthet und mit den Innenseiten der Stäbe eines Stromwenders verbunden, so erhalten wir eine vollständige Ankerwicklung.

Es ist klar, dass die in Figur 204 dargestellten Reihen von Leitern auch noch in anderer Weise, als wie in den Figuren 205 und 206 gezeigt ist, aufgetheilt werden könnten. Zum Beispiel könnten alle Theile, die *Rcd*, *R'c'd'* u. s. w. ähnlich sind, zu einer Leiterebene aufgebaut werden, die Theile *dht*, *d'h't'* u. s. w. würden dann die zweite Ebene bilden.

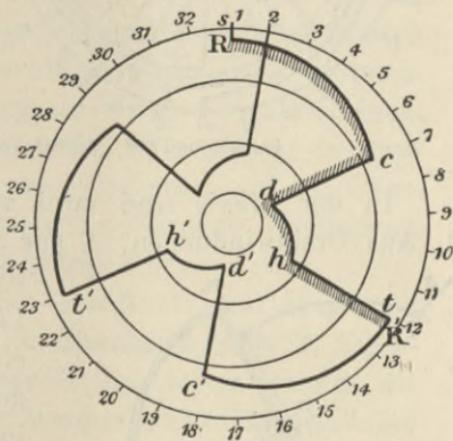


Fig. 204. Schemavon Desroziers' Wicklung.

Bei Hochspannungsmaschinen, wo für jedes Segment eine Anzahl Windungen erforderlich ist, kann die Verbindung wie in Figur 207 ausgeführt werden, in welcher dieselben Buchstaben zur Bezeichnung gleichliegender Theile gebraucht sind.

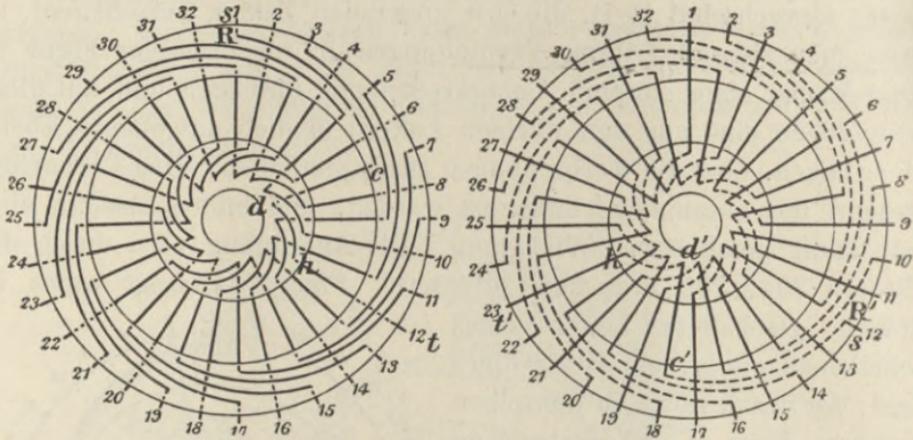


Fig. 205 und 206 Aufbau von Desrozier's Scheibenanker.

In der Praxis sind zwei verschiedene Bauarten gebräuchlich: 1. Aus Drahtwindungen, 2. aus Streifen aufgebaute Anker. In den

Ersteren wird der Draht durch Löcher in zwei concentrisch aufeinandergelegte Pappdeckelscheiben geführt, welche die äussere und innere Unterstützung für jede Leiterebene abgeben. Die beiden Ebenen werden Stirn gegen Stirn auf einen eisernen Radstern aufgebracht, dessen radiale Arme zwischen beiden Leiterlagen hindurchgehen¹⁾. Grosse Maschinen können nach dieser Bauart so leicht hergestellt werden, dass sie nicht mehr als 25 kg für die Pferdekraft wiegen. Der Wirkungsgrad ist ebenso hoch als bei guten Gleichstrommaschinen gewöhnlicher Bauart mit Kernankern.

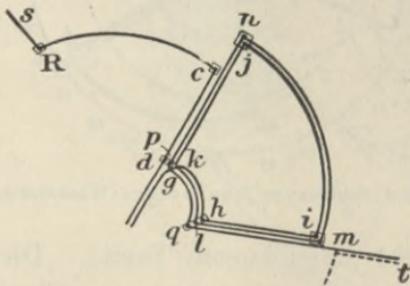


Fig. 207. Scheibenwicklung für hohe Spannung.

1) Wegen weiterer Einzelheiten über diese Maschinen vergl. Electr. Engin., N. Y., Bd. 16, S. 259.

Kapitel XIII.

Praktischer Aufbau der Anker.

In den früheren Kapiteln ist noch wenig gesagt über die besonderen Arten, die Ankerleiter zu sichern, zu isoliren und zu lüften. Der grösste Theil des vorliegenden, dieses Gebiet behandelnden Kapitels gilt ausschliesslich für Gleichstrommaschinen und Motoren, jedoch findet ein Theil auch Anwendung auf Wechselstrommaschinen.

Anker mit Eisenkernen lassen sich im Allgemeinen in zwei Klassen eintheilen: Solche, bei denen die Windungen auf der Oberfläche glatter Kerne liegen, und solche mit versenkten Windungen, die in Schlitze oder Löcher der Kerne gelegt sind.

Ankerkerne. Kerne werden stets geblättert, und hergestellt entweder aus: 1. Eisenblechscheiben, 2. Eisenband, oder 3. Eisendraht. Eisenband wird nur für scheibenförmige Anker benutzt, die durch die Seiten hindurch magnetisirt werden. Für Trommelanker und Anker in verlängerter Ringform verwendet man fast allgemein Scheiben, die aus weichem Schmiedeeisen- oder Flusseisen-Blech gestanzt worden sind. Die Stärke der Bleche beträgt in der Regel 0,5 bis 0,6 mm. Sie sollen aus Eisen hergestellt sein, welches eine möglichst geringe Hysteresis besitzt. Nach dem Ausstanzen müssen sie ausgeglüht und die Unebenheiten an den Rändern beseitigt werden.

Sodann werden die Scheiben, wenn sie glatt (d. h. ungezahnt) sind, auf der Welle vereinigt, auf die Drehbank gebracht und abgedreht, danach durch leichtes Schleifen gegen ein Schmirgelrad bearbeitet und endlich wieder auseinandergenommen. Ehe die Scheiben dann endgültig auf dem Anker wieder befestigt werden, müssen sie voneinander etwas isolirt werden. Zu diesem Zwecke bedeckt man entweder eine Fläche der Scheibe mit gefirnisstem Papier von 0,02 bis 0,06 mm Stärke, oder man überzieht beide Flächen jeder Kernscheibe mit Firniss, Wasserglas (Allgemeine Elektrizitätsgesellschaft Berlin) oder einem sonstigen isolirenden Anstrich. Isolirung durch Glimmer würde zu kostspielig werden und ist auch nicht nothwendig, da es

nur einer mässigen Isolation bedarf. Die beiden Endscheiben stellt man in der Regel aus stärkerem Eisen her und macht sie zuweilen bis zu 12 mm stark. Bei scheibenförmigen Ankern müssen die Eisenbänder durch Zwischenlagen von gefirnisstem Papier isolirt werden.

Zur Versteifung eines scheibenförmigen Ankerkernes nimmt man gewöhnlich einen Hauptring aus weichem Eisen; in einzelnen Fällen wird dieser mit einer vorragenden Schneide versehen, zu deren Seiten das Eisenband aufgewickelt wird. Ein Beispiel dieser Bauart liefert die Victoriamaschine (von Mordey, Fig. 283).

Bei grossen Maschinen werden die Kernscheiben mit Rücksicht auf den Verlust beim Ausstanzen aus Stücken hergestellt, die sich in aufeinanderfolgenden Lagen überdecken; jedes Stück besitzt, wie die Figur 208 zeigt, Löcher zum Durchstecken von Bolzen.

Drahtkerne waren in früherer Zeit vielfach in Gebrauch und wurden z. B. von Gramme benutzt. Der weiche gefirnisste

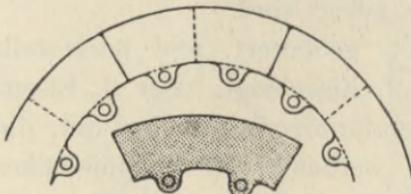


Fig. 208. Gethheilte Kernscheibe (Kapp).

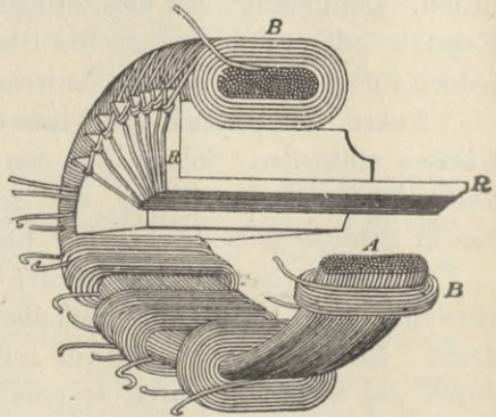


Fig. 209. Ring mit Drahtkern (Gramme).

oder mit einer schwachen Oxydschicht bedeckte Eisendraht wurde auf eine besondere Form gewickelt, dann abgenommen, mit Band umgeben und endlich mit den Kupferleitern bewickelt (Fig. 209).

Kerne aus rundem Draht besitzen in drei Beziehungen Nachteile: 1. sie genügen in mechanischer Hinsicht weniger als Kerne aus Scheiben; 2. wegen der von den einzelnen Drähten gebildeten Zwischenräume erhält ein Raum von gegebener Grösse für den Kern thatsächlich einen geringeren Eisenquerschnitt; es werden nur etwa drei Viertel des Querschnittes vom Eisen eingenommen; 3. in radialer Richtung fehlt dem Drahtkern der ununterbrochene Zusammenhang, und es entsteht infolge dessen ein unnöthiger Widerstand für die magnetischen Linien. Wird der runde Draht durch solchen von quadratischem Querschnitt ersetzt, so ist dies in jeder Beziehung eine Verbesserung.

Eine andere Art der Herstellung von Drahtkernen war an der Maschine von Bürgin angewendet. Der Anker dieser Maschine

bestand ursprünglich aus verschiedenen nebeneinander auf einer Welle gelagerten Ringen. Die Ringe waren aus Eisendraht auf einem quadratischen Rahmen hergestellt und besaßen je vier Wickelungen. Crompton änderte die quadratische Form in eine sechseckige mit sechs Wickelungen und vermehrte die Ringe auf zehn. Es zeigte sich indessen, dass der Anker in keiner Weise einem gewöhnlichen Anker von Gramme überlegen war.

Gezahnte Kerne. Der von Pacinotti 1864 hergestellte Anker (Fig. 211) hatte einen gezahnten Ringkern aus massivem Eisen, der von Messingspeichen getragen wurde. Um die Wickelungen auseinanderzuhalten, waren an den Zähnen Buchsbaumklötze befestigt. Anker mit gezahnten Kernscheiben sind von dem Verfasser schon seit langer Zeit beständig empfohlen und werden neuerdings fast ausschliesslich verwendet. Im Gegensatz zu glatten Ankern besitzen sie vier Vortheile:

1. Die Zähne bieten ein vorzügliches Mittel zum Umtrieb der zwischenliegenden Kupferleiter;

2. die Zähne lassen sich dicht an die Polflächen des Feldmagnetes heranbringen, so dass ein sehr geringer Spielraum bleibt. Dadurch wird der magnetische Kreis verbessert und die zur Erregung der magnetischen Strömung erforderliche Kupfermasse lässt sich vermindern;

3. der Zug wirkt fast nur auf das Ankereisen statt auf die Kupferleiter, wie Figur 210 zeigt;

4. wenn die Schlitze tief genug sind, sind die Leiter fast vollkommen gegen Wirbelströme geschützt.

Diesen Vortheilen steht aber der Nachtheil gegenüber, dass es grössere Mühe verursacht die Kanäle zwischen den Zähnen des zusammengesetzten Kernes gut auszuarbeiten, und besonders schwierig ist den Kern von den Leitern zu isoliren; ferner die Neigung der Zähne, in den Polflächen Wirbelströme zu erregen. Dem letzteren kann durch eine grössere Zahl schmaler Kerne vorgebeugt werden, sowie dadurch, dass die Polflächen mit Einschnitten versehen werden, ferner durch Vergrösserung des Zwischenraumes zwischen Zähnen und Polflächen; am besten wohl, wenn der ganze Anker aussen mit einer Lage von Eisendraht versehen wird.

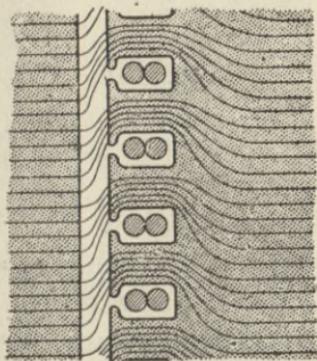


Fig. 210. Versenkte Ankerwicklung und magnetischer Zug auf die Zähne.

Gezahnte Anker wurden zeitweilig viel von Paterson und Cooper gebaut; aber die englischen Constructeure bevorzugten im Allgemeinen glatte Kerne. In den Vereinigten Staaten und in Deutschland ist dagegen der glatte Kern die Ausnahme und der gezahnte die Regel. Figur 212 zeigt die bei den kleinen Crocker-Wheeler'schen Motoren gebrauchte Ankerform (vergl. Fig. 341). Die Kernscheiben bestehen zur Erleichterung der Herstellung der Wickelung aus zwei Theilen-

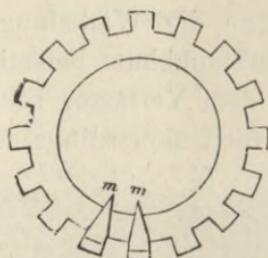


Fig. 211. Pacinotti's
gezahnter Ringanker
(1864).

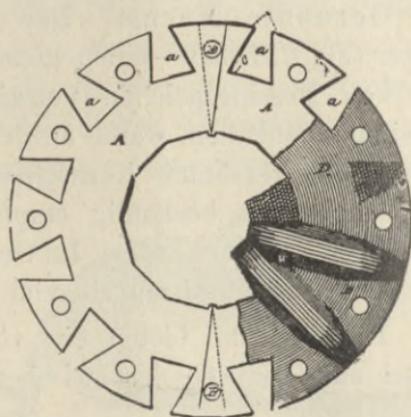


Fig. 212. Ankerkern des Crocker-
Wheeler'schen Motors.

Gerade Zähne (wie in Figur 211) und dreieckige (wie in Figur 212) sind aber wenig beliebt. Bevorzugt werden T-förmige, mit ziemlich tiefen Schlitten zwischen den Zähnen, wie in Figur 213 dargestellt.

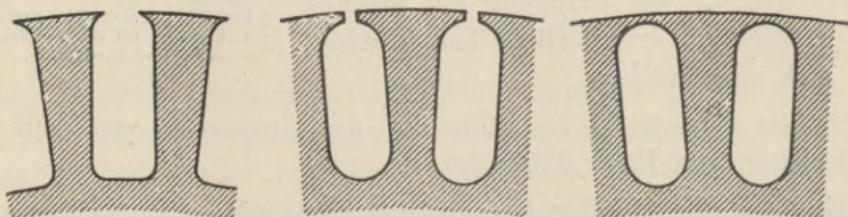
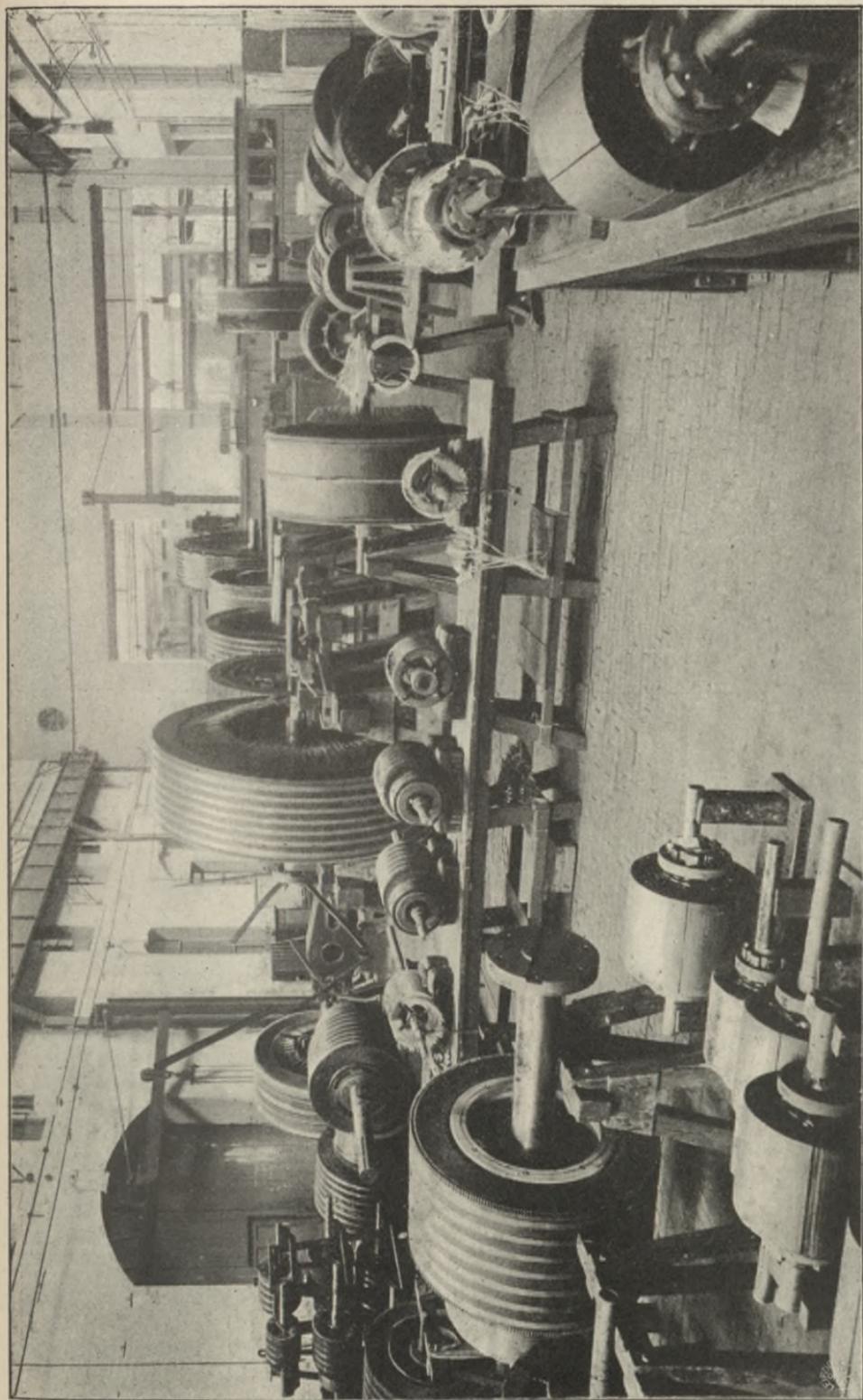


Fig. 213, 214 und 215. Kernscheiben mit Zähnen, Schlitten und Löchern.

Zuweilen findet man sie in der Form Figur 214, wobei der Schlitz wie eine längliche Durchbohrung aussieht, welche nur eine enge Oeffnung an der Peripherie hat. Nachdem die Scheiben auf die Welle gebracht sind, werden die Schlitz sorgfältig ausgefeilt und nachgearbeitet, um vorstehende Ränder, welche die Isolation verletzen könnten, zu entfernen. Figur 216 zeigt den Ankerwickelungsraum in den Werkstätten der Elektricitäts-Aktiengesellschaft vormals Schuckert & Co. in Nürnberg mit einer grösseren Zahl von Ankern in den verschiedenen Stadien der Herstellung. Figur 217 stellt die Ankerwickelung der Firma Siemens & Halske, Aktiengesellschaft in



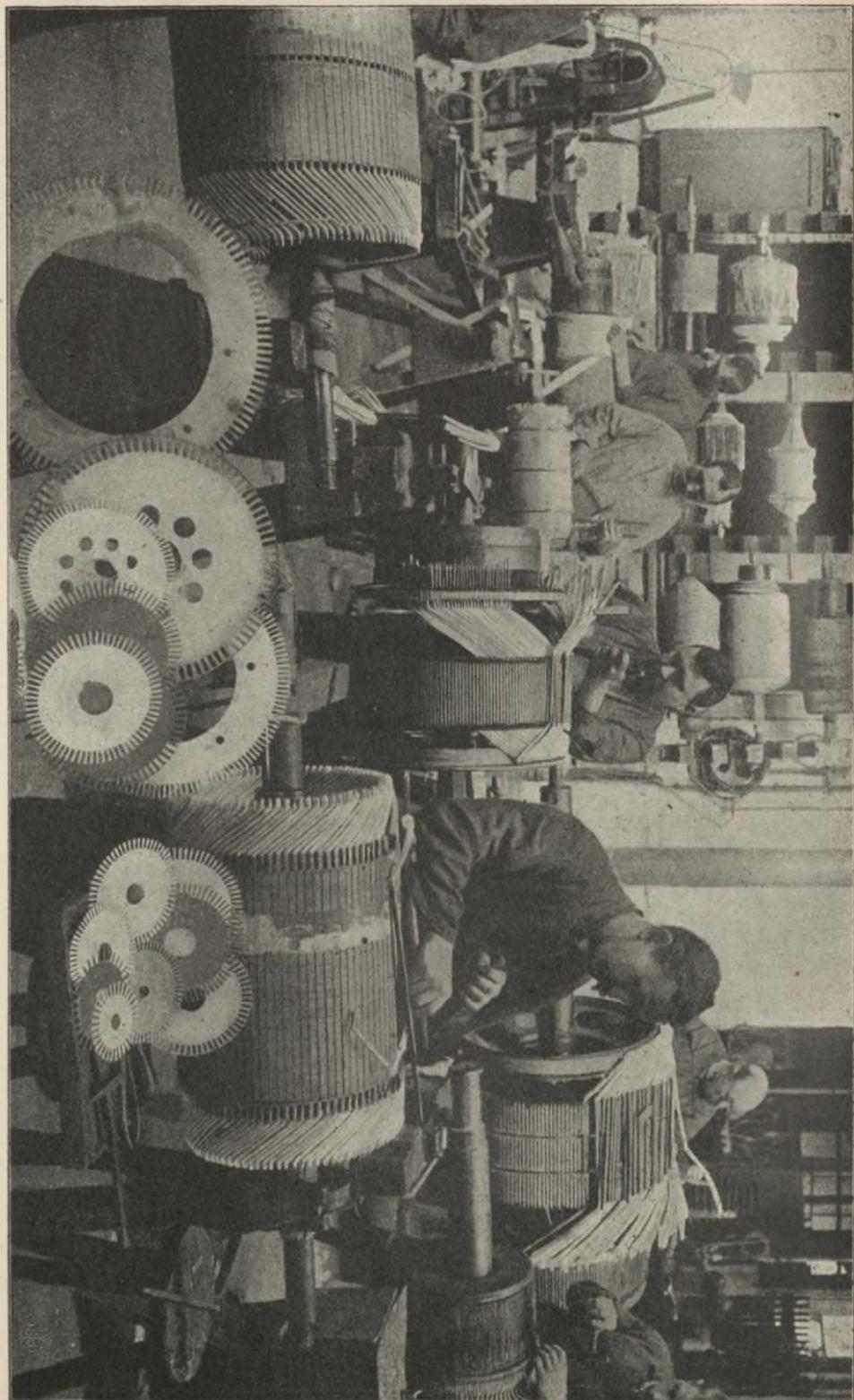


Fig. 217. Ankerwerkzelei der Firma Siemens & Halske, Aktiengesellschaft, Charlottenburg.

Charlottenburg dar, und zeigt im Vordergrund die Aufbringung einer Schablonenwickelung auf einen Anker. Die Figur lässt ferner die Art und Weise erkennen, wie die isolirten Leiter bei Trommelankern eingezogen werden.

Bei T-förmigen Zähnen ist es nicht erforderlich, aussen noch Bindedrähte anzubringen; die Leiter werden dadurch sicher in ihrer Lage gehalten, dass man den Schlitz durch einen langen Holzkeil verschliesst, nachdem die isolirten Drähte eingezogen sind.

Durchbohrte Kernscheiben. Die von gezahnten Kernscheiben gebotenen Vortheile kommen in noch höherem Grade den Kernscheiben zu, die am Umfange mit zur Achse parallel laufenden Durchbohrungen versehen sind. Solche Scheiben sind von Parsons, Swinburne und Brown benutzt worden. Wenström wendete geschlitzte Löcher an. Die Leiter werden in derartigen Anker durch Isolirrohre geführt, die in den Durchbohrungen liegen. Sowohl in mechanischer als auch in magnetischer Hinsicht ist diese Bauart völlig genügend. Wie schon auf Seite 267 erwähnt wurde, besteht eine besondere und werthvolle Eigenschaft der durchbohrten Kernscheiben darin, dass sie die eingeführten Kupferleiter vollständig vor den Wirbelströmen schützen, die sonst in ihnen erregt werden würden.

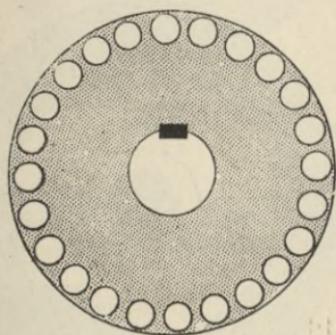


Fig. 218.
Kernscheibe mit Bohrungen.

Triebspeichen und Ankersterne. Ankerkerne werden in der Regel auf einem innern Gestell oder einem Scheibengerippe aufgebaut, das fest auf der Welle sitzt. Bei Trommelankern kann dieses innere Traggestell entbehrt werden; die Kernscheiben werden unmittelbar auf der Welle befestigt. Manche Fabriken stanzen sechsseitige Löcher in die Kernscheiben und ziehen sie dann auf eine sechsseitige Welle.

Häufig hält man die Kernscheiben mittels durchgreifender isolirter Bolzen zusammen und treibt sie mittels Ankersternen, die auf der Welle befestigt werden, um (Fig. 219). Es lässt sich gegen diese Bauart der Einwand erheben, dass die Bolzenlöcher den wirksamen Querschnitt des Eisens verringern und die Kraftlinienmenge vermindern. Die Bolzen müssen auch von den Armen der Sterne durch Ebonitscheiben und Buchsen isolirt werden, da andernfalls das Gestell einen geschlossenen Kreis für Wirbelströme bietet, die es erwärmen.

Eine bessere Bauart verwenden Paterson und Cooper (Fig. 220). Hier ist der Querschnitt des Eisens nur wenig verringert, die Bolzen befinden sich ganz im Innern des Kernes.

Bei einer andern Bauart versieht man die Kernscheiben mit Schwalbenschwanznuthen, in die von der Welle aus Ansätze eingreifen.

Crompton führte diese Bauart im Jahre 1886 ein; zur Verbindung der Speichen mit der Achse war die letztere der Länge nach mit drei tiefen Einkehlungen versehen.

Mit Rücksicht auf die Kosten der Herstellung werden die ausgekehlten Wellen selten mehr verwendet; eine gerippte Buchse, die mittels Feder und Nuth auf der cylindrischen Welle gleitet, kostet weniger und leistet mechanisch dasselbe. Bei einer anderen Form bestehen die vier Triebspeichen aus einem Stück.

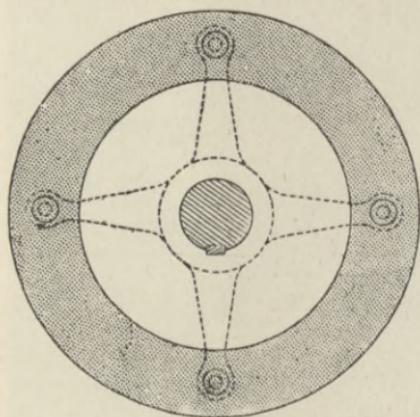


Fig. 219. Umtrieb der Kernscheiben.

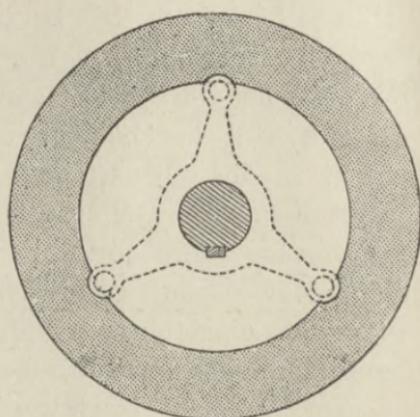


Fig. 220. Umtrieb der Kernscheiben nach Paterson und Cooper.

In welcher Weise Kapp die Kernscheiben antreibt, zeigt die Figur 221. Ueber die Welle ist eine lange Buchse geschoben, die drei Arme oder Flanschen zum Eingriff in die Kernscheiben trägt. Um die Buchse auf der Achse an der Drehung zu verhindern, ist eine lange Feder, die in eine flache Nuth auf der Achse eingreift, eingeschoben.

Die Buchse hat noch den Vortheil, dass sie die Achse versteift. Bei Ankern mit Ringwicklung besteht dieses innere Gestell aus Rothguss, bei Trommelankern aus Gusseisen. Es wird gegen eine Endplatte aufgetrieben, die an eine Stossscheibe auf der Achse anliegt; die Kernscheiben werden zwischen den zwei Endplatten dicht zusammengeschraubt. Die untere Figur zeigt die Form der isolirenden Ebonitstreifen.

In den Figuren 222 und 223 ist die Bauart nach der Anordnung von Brown dargestellt. Figur 223 entspricht der auf Tafel VII dargestellten Maschine. Es sind zwei Sterne vorhanden, jeder besitzt

vier innere Arme und breite Endflanschen. Die Drehung auf der Welle wird durch eingepresste Keile verhindert. Der eine Stern legt sich gegen einen Stossring der Achse; nach Aufbringung der

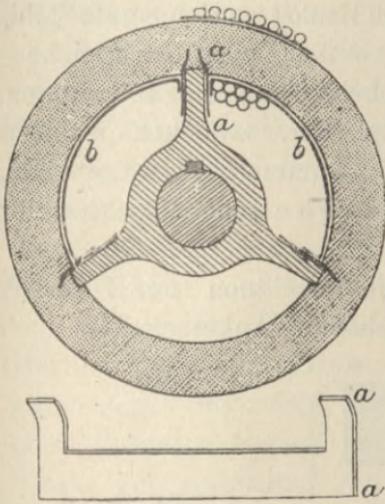


Fig. 221. Umtrieb der Kernscheiben nach Kapp.

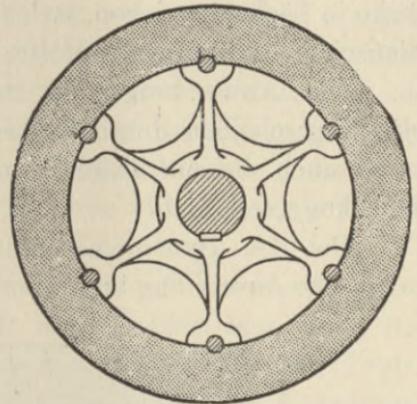


Fig. 222. Brown's neueste Methode, Kernscheiben mittels Keilbolzen aufzuziehen.

Kernscheiben wird der andere mittels einer grossen sechsseitigen Schraubmutter dagegen getrieben. Zwei Arme an jedem Stern

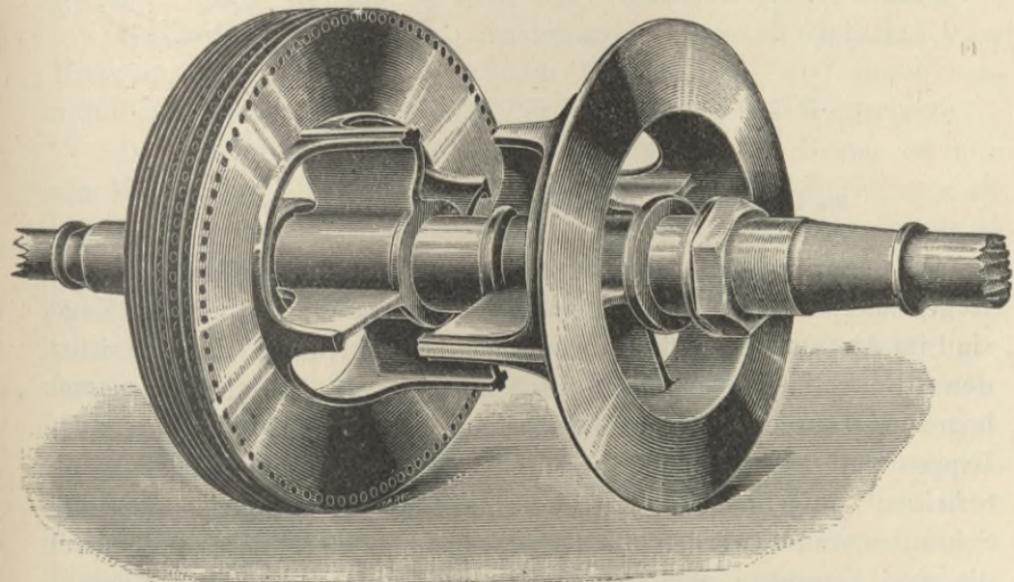


Fig. 223. Brown's Methode der Befestigung von Kernscheiben.

besitzen oberhalb eine Rippe; die Kernscheiben sind entsprechend mit Nuthen versehen, die auf diese Rippen passen, so dass die Drehung der Scheiben um die Sterne verhindert wird. Zwei von den Armen haben in axialer Richtung eine geringere Breite als die

ändern, so dass bei dem Zusammenschieben der Sterne die Scheiben zusammengepresst werden können. Aehnliche Anordnungen findet man jetzt bei vielen Fabriken.

Bei der in Fig. 222 dargestellten neueren Bauart werden runde Stahlkeile in Löcher getrieben, welche zur Hälfte in den Enden der Speichenflanschen, zur anderen Hälfte in den Scheibenringen sich befinden.

Die Anwendung der starken Endplatten, zwischen welchen die Kernscheiben durch Schraubenbolzen zusammengepresst werden, zeigt auch die auf Tafel IV dargestellte Brown'sche Maschine der Oerlikongesellschaft.

Bei den Dynamomaschinen und Triebmaschinen von Immish wird eine Anordnung angewendet, bei welcher die Ankerscheiben auch

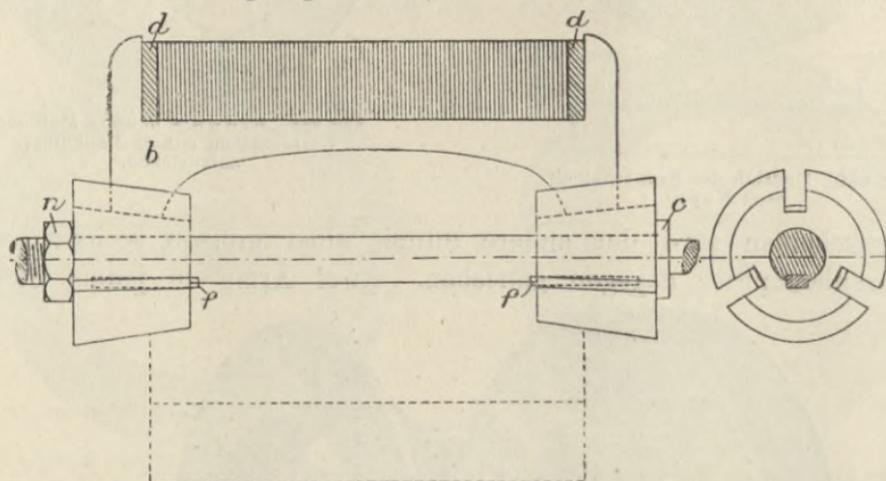


Fig 224. Methode von Immish zum Befestigen der Kernscheiben.

in radialer Richtung festgespannt werden. Mit der Achse sind zwei Kegel aus Rothguss durch Feder und Nuth verbunden. In jedem Kegel sind im Abstand von 120 Grad voneinander drei Nuthen eingeschnitten, deren Bodenfläche ebenfalls konisch ansteigt. In diese Nuthen passen bogenartig ausgeschnittene Flansche aus Rothguss mit vorspringenden Lappen an ihren beiden Enden. Auf die Flanschen werden die Scheiben aufgebracht. Mittels einer auf der Achse sitzenden Schraubenmutter werden die Kegel gegeneinander gepresst, dadurch die drei Flanschen nach Aussen gedrückt und die Kernscheiben so an drei Punkten des innern Umfanges festgelegt (Fig. 224).

Aehnliche Anordnungen hat auch die Elektrizitäts-Aktiengesellschaft vorm. Schuckert & Co. in Nürnberg bei grösseren Ankern angewendet. Eine andere auf Tafel XI dargestellte Art der Befestigung ist ebenfalls bei Ankern von grossem Durchmesser anwendbar.

Bei der Beurtheilung der verschiedenen Befestigungsarten darf man nicht übersehen, dass durch Zusammenpressen die magnetische Durchlässigkeit des Eisens in der Richtung des Druckes sich vermindert und dass durch Zugspannung die Durchlässigkeit anwächst.

Isolirung der Eisenkerne. Es ist schon erwähnt worden, dass die Kernscheiben durch Zwischenlagen von Papier oder durch Firniss voneinander isolirt werden; hauptsächlich aber müssen sie an dem Umfange vor gegenseitiger metallischer Berührung geschützt werden. Abgesehen von dieser Isolirung gegeneinander, müssen die Scheiben sehr sorgfältig vor der äusseren Berührung mit den Kupferleitern geschützt werden.

Gewöhnlich überzieht man glatte Kerne mit einer oder zwei Bekleidungen von Firniss oder Lack und bedeckt sie dann mit einer Lage von zähem Material, etwa mit Canevas, Manila-Papier oder Willesden-Papier, das mit Schellackfirniss oder mit Kautschukfirniss gut gestrichen worden ist. Bei gezahnten Kernen werden Kanäle aus gefirnisstem Papier oder aus Papier mit Zwischenlagen von Glimmer eingelegt. Bei Kernen für Ringwickelungen muss man besonders sorgfältig den innern Umfang und die Triebspeichen, denen die innern Windungen zunächst liegen, isoliren.

Lüftung der Anker. Ankerkerne erwärmen sich aus drei Ursachen: durch Hysteresis, durch Wirbelströme und durch unmittelbare Uebertragung infolge der Erwärmung der Kupferleiter.

Die beschriebene sorgfältige Blätterung und Isolirung ist nur ein Mittel, der Kraftvergeudung vorzubeugen und Ueberhitzung zu vermeiden. Bei den Maschinen mit Ringwicklung ist in der Regel eine genügend grosse Oberfläche zur Abgabe der in den Kupferleitern erzeugten Wärme vorhanden, ohne dass man zu einer besondern Lüftung schreiten muss. Bei grossen und massiv gebauten Trommelankern jedoch kann eine besondere Lüftung nothwendig werden. Bei den Trommelankern älterer Bauart mit sich an den Enden überdeckenden Drahtwindungen ist eine gleichmässige Lüftung unmöglich. Als Beispiele durchlüfteter Kerne vergleiche man den Trommelanker von Kapp (Tafel II) und von Brown (Tafel VII). Bei dem auf Tafel XI dargestellten grossen Generator für Strassenbahnen sind im Anker besondere Kanäle zur Lüftung angeordnet.

Wenn Trommelwickelungen mit Endverbindungen versehen werden, so ist die Anordnung mit einem Satz von Spiralverbindungen und einem Satz gerader radialer Stücke (wie in Fig. 177) der

Anordnung vorzuziehen, die aus zwei Sätzen von Spiralen besteht (Fig. 179), weil die erste Anordnung eine bessere Gebläsewirkung besitzt. Einige Erbauer benutzen auch Sterne mit Speichen, die wie die Flügel einer Windmühle schief stehen, um dadurch die Luft durch das Innere des Ankers zu treiben.

Abgleichung der Masse des Ankers. Es ist sehr notwendig, die Masse des Ankers gut abzugleichen, weil sonst beim Umlauf schädliche Schwingungen entstehen. Meist prüft man einen Anker in der Weise, dass man ihn mit den Achszapfen auf zwei parallele Metallschienen (oder Schneiden) legt und beobachtet, ob der Anker in jeder Lage liegen bleibt, ohne weiter zu rollen. Es ist sehr angebracht, in dieser Weise den Anker auf Abgleichung zu prüfen, wenn der Kern zur Aufnahme der Wickelung fertig ist, und die Prüfung zu wiederholen, wenn die Wickelung aufgelegt worden ist. Sind die Endscheiben aus dickem Eisen hergestellt, so kann man zur Erzielung vollständiger Abgleichung Löcher einbohren, oder man kann Bleipflöcke einsetzen.

Die beschriebene Art der statischen Abgleichung ist jedoch nicht vollkommen; denn wenn die Massen, die um die Achse herum sich abgleichen, unsymmetrisch längs der Achse vertheilt sind, so entsteht beim Umlauf das Bestreben einer Drehung um die Achse des maximalen Trägheitsmomentes, wodurch Schwingungen hervorgerufen werden.

Triebstücke. Es ist von besonderer Bedeutung, dass die Ankerleiter sicher umgetrieben werden, weil sie sonst infolge des tangentialen Zuges im magnetischen Feld in ihrer Lage verändert werden (vergl. Seite 94). Bei Ringwickelungen wird man dieser schädlichen Wirkung weniger leicht begegnen als bei Trommelwickelungen, weil die durch das Innere des Kernes tretenden Wickelungen bindend wirken und gegen die Triebspeichen drücken. Aber auch bei Ringankern findet man es notwendig, an einer Anzahl Stellen um die Peripherie herum den Antrieb zu sichern. Crompton hielt es für erforderlich, Buchsbaumkeile zwischen die Kernscheiben zu treiben. Er ging dann zu einer Bauart über, bei der zur Durchlüftung Stücke aus Fiber in Zwischenräumen zwischen die Kernscheiben gebracht sind; die so entstandenen Zwischenräume sind zur Einfügung von Triebstücken zwischen den Drähten geeignet. Kapp benutzt vorstehende schmale Stahlstücke, die durch harte Fiber geschützt werden. Goolden verwendet Streifen von harter weisser Fiber, die in flache Nuthen in der Oberfläche des Kernes

eingesetzt und durch äussere Bindedrähte gehalten werden. Bei scheibenförmigen Ankern müssen die Triebstücke an den Seiten vorragen und zwischen den Kernbändern eingesetzt werden.

Bindedrähte. Nach erfolgter Bewickelung des Ankers müssen die Leiter in ihrer Lage durch eine Anzahl äusserer Bänder, die sogen. Bindedrähte, gesichert werden. Dieselben müssen sehr stark sein, um der Fliehkraft Widerstand zu leisten und die Leiter von seitlicher Verschiebung abzuhalten. Die Bindedrähte dürfen aber nur eine sehr geringe radiale Tiefe einnehmen, weil der Zwischenraum zwischen den Leitern und den Polflächen so eng als möglich gehalten werden muss. Fast stets wird verzinnter hartgezogener Messing- oder Stahldraht benutzt, der nach der Wickelung mit Loth

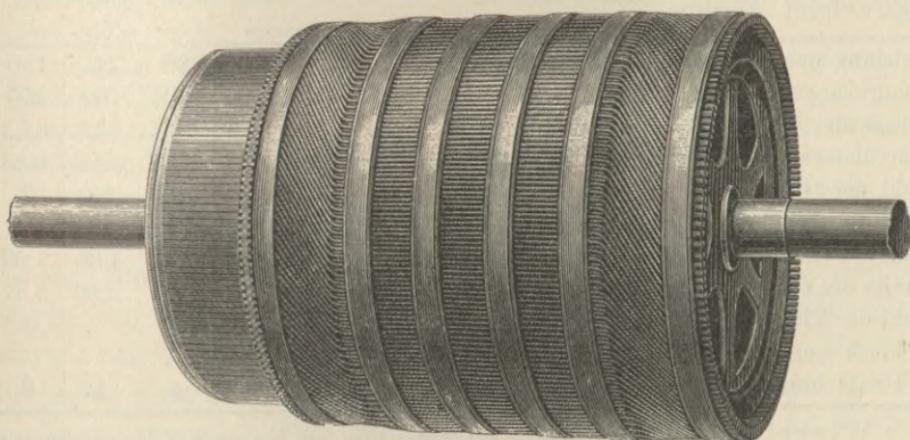


Fig. 225. Trommelanker einer Dynamomaschine von Fein.

zu einem zusammenhängenden Bande vereinigt werden kann. Für die Bemessung der Stärke der Bindedrähte lassen sich Regeln nicht aufstellen. Eine häufig gebrauchte Abmessung ist ein Durchmesser von etwas weniger als 1 mm. Der Draht wird in Gürteln von je 10 bis 30 Windungen aufgelegt, die einzelnen Gürtel sind 2,5 bis 5 cm voneinander entfernt. Unter jeden Gürtel von Bindedrähten muss ein isolirendes Band gelegt werden. Dies besteht in der Regel aus zwei Lagen: zunächst kommt ein Streifen dünner vulkanisierter Fiber, der etwas breiter als der Drahtgürtel ist, darauf ein Glimmerstreifen (in kurzen Stücken) von ungefähr gleicher Breite. Einige legen ein schmales Messingband unter jeden Drahtgürtel, dessen Enden übergebogen und verlöthet werden, um die beiden Drahtenden vor dem Abfliegen zu schützen. Die Figur 225 zeigt einen vollständigen Trommelanker mit sechs Gürteln von Bindedrähten. Als Beispiel mag erwähnt werden, dass Esson für einen

glatten Trommelanker von 25,4 cm Durchmesser und 30,5 cm Länge empfiehlt, sechs Gürtel von 0,46 mm starkem Draht aufzubringen; jeder Gürtel ist 1,6 cm breit und enthält ungefähr 33 Windungen, die Gürtel haben etwas weniger als 3,8 cm Abstand voneinander. Auf einer Trommel oder einem Ring von 50,8 cm Durchmesser werden 0,89 mm starke Drähte aufgebracht, die Gürtel sind 1,27 cm breit und stehen etwa 5 cm voneinander ab.

Bei den vielpoligen Dynamomaschinen der General Electric Co. (vergl. Fig. 292) werden Bänder aus Phosphorbronze statt der Bindedrähte angewendet. In der folgenden Tabelle sind die Einzelheiten der Bindungen angegeben, welche bei einigen Trommelankern mit glatten Kernen der Edison'schen zweipoligen Dynamomaschinen angewendet werden.

Leistung der Maschinen in Kilowatt	1	10	30	50	150
Umdrehungen in der Minute	2100	1600	1200	700	450
Länge des Ankerkörpers in cm	16,5	30,4	45,7	62,2	67,3
Durchmesser des Ankerkörpers in cm	8,9	15,9	23,3	32,9	60,3
Zahl der Gürtel	6	7	9	13	7
Zahl der Windungen jedes Gürtels	22	19	21	18	24
Durchmesser der Messing-Bindedrähte in mm .	0,50	0,68	0,81	1,06	1,06
Breite der Glimmerunterlage 0,25 mm dick in cm	1,43	2,54	2,54	2,86	3,81
Zahl der Klammern für jeden Gürtel (aus Kupferblech von 0,36 mm Dicke und 2 bis 4 mm Breite bestehend)	2	3	4	4	6

Wicklung der Anker. Ist eine der im Kapitel XII erörterten Wickelungsarten gewählt, so handelt es sich um deren Ausführung in der Werkstatt. Zuerst wollen wir Ringwickelungen, darauf Trommelwickelungen betrachten. Ein wesentlicher Unterschied kann zwischen Ankern mit Drahtwicklung, und Ankern, deren Wicklung aus Stäben mit Verbindungen oder aus besonders construirten Theilen besteht, die man zusammensetzt, anstatt aufwickelt, gemacht werden. Mit Draht bewickelte Anker werden in der Regel verwendet, wenn es sich um Stromstärken von weniger als 100 Ampere handelt, also z. B. für alle Bogenlichtmaschinen.

Für kleine Maschinen, sowie für Bogenlichtmaschinen wird in der Regel einfacher runder Draht verwendet, der mit doppelter Baumwollenlage besponnen und darauf mit Schellackfirniss getränkt worden ist. Selten wird der Draht mit Seide umspinnen. Für kleine Maschinen zur Elektrolyse werden häufig mehrere runde, parallel geschaltete Drähte benutzt, sogar bis zu 20 oder 30 nebeneinander liegende Drähte. Die Drahtziehereien liefern auch rechteckigen

Draht von jeder gewünschten Abmessung; jedoch ist bei grösseren Querschnitten der leichteren Biegsamkeit halber ein rechteckiger Leiter, der aus drei oder vier besondern, nebeneinander liegenden Streifen besteht, vorzuziehen. Dieser zusammengesetzte Leiter wird mit Band bedeckt, um die Streifen zusammenzuhalten. Hierbei wird noch der Vortheil erreicht, dass in den Leitern selbst keine Wirbelströme erregt werden.

Uebersteigt die Stromstärke 200 Ampere, so werden häufiger Stabwickelungen benutzt, weil Drähte, die stark genug sind, um den Strom zu leiten, nicht biegsam genug sind. Die beiden Wickelungsarten können in verschiedener Weise hergestellt werden, und zwar

Anker mit Drahtwicklung aus:

Einfachem runden Draht;
zwei oder mehr runden, parallel
liegenden Drähten;
Drahtlitzen;
einfachem quadratischen Draht;
einfachem rechteckigen Draht;
geblätternen Streifen.

Anker mit Stabwicklung aus:

Runden Stäben;
rechteckigen Stäben;
übereinandergelegten rechteckigen
Streifen;
rechteckigen Stäben aus zusammen-
gepressten Drahtlitzen;
besonders geschmiedeten Stücken.

Für Anker mit Stabwicklung benutzt man häufiger rechteckige, auf die Kante gestellte Stäbe, als runde Stäbe; Anker mit massiven Stäben auf der Aussenseite führen indessen einen Energieverlust herbei, der bei Ankern mit Drahtwicklung nicht eintritt. Besitzen die Leiter eine ziemliche Breite, so entstehen in ihnen beim Eintritt in das magnetische Feld oder beim Austritt aus demselben Wirbelströme. Dies rührt daher, dass eine Kante des Stabes durch einen Theil des Feldes laufen kann, dessen Stärke sehr verschieden ist von der Stärke desjenigen Feldes, durch das die andere Kante hindurchgeht. Nimmt man eine Umfangsgeschwindigkeit von 500 bis 550 m in der Minute an, so wird es praktisch unmöglich, die Polecken so zu gestalten, dass eine übermässige Erwärmung der massiven Kupferstäbe auf dem Anker vermieden wird, falls die Breite der Stäbe mehr als 5 mm beträgt. Der Energieverlust infolge der Erzeugung von Wirbelströmen kann den Wirkungsgrad der Maschine um mehr als 5 Procent herabdrücken. Dies trifft indessen bei denjenigen Ankern nicht zu, deren Stäbe zwischen Zähnen versenkt sind oder die in Bohrungen der Kernscheiben liegen. Um die Verluste zu vermindern, hat man die Stäbe aus verschiedenen, auf ihrer Oberfläche oxydirten Streifen hergestellt, oder letztere leicht durch Einölen oder Ueberdeckung mit Firniss isolirt und sie dann nur an ihren Enden miteinander verbunden.

Crompton¹⁾ hat verschiedene Methoden zur Verdrillung oder Uebereinanderlagerung von zwei oder mehr Streifen in Vorschlag gebracht, in der Absicht, die Wirbelströme wirksam zu neutralisiren.

Neuerdings gebrauchen er und Andere Stäbe, die aus Kupferdrahtlitzten bestehen und in eine rechtwinkelige Form gepresst worden sind; jeder Draht der Litze wird oxydirt oder leicht isolirt.

Noch eine andere Art der Ankerwickelung besteht darin, dass die isolirten Drähte oder Streifen auf besondere Formen in Gruppen aufgewickelt und dann nachher auf oder um den Ankerkern gelegt werden. Diese Methode besitzt den Vortheil, dass man leichter eine vollständige Isolation zwischen den Theilen der Wickelung erreichen kann, die sich wesentlich im Potential voneinander unterscheiden. Wenn bei Trommelwickelungen die Leiter eine Lage bilden, so besteht zwischen jedem Leiter und dem ihm benachbarten eine erhebliche Potentialdifferenz. Liegen die Leiter in zwei Lagen, so kann eine isolirende Zwischenlage angebracht werden. Eine aus zwei Lagen bestehende Wickelung ist bei Trommelankern ausserordentlich bequem, da sie die Herstellung der Verbindungen sehr erleichtert.

Mit Draht bewickelte Anker werden nach Vollendung der Wickelung gewöhnlich gut mit Schellackfirniss oder mit Gummi-lösung bestrichen. Sie müssen dann in einem Trockenraum gut ausgetrocknet werden.

Wickelungen für Ringkerne. Soll ein glatter Ringkern bewickelt werden, so zeichnet man auf die Endflächen häufig eine Anzahl radialer Linien auf, deren Abstand den einzelnen Abtheilungen entspricht. Hierdurch wird die Arbeit des Aufwickelns erleichtert. Ringwickelungen machen jedoch im Allgemeinen wenig Mühe, nichtsdestoweniger muss mit Sorgfalt verfahren werden. Die einzelnen Abtheilungen werden fast stets besonders auf den Kern gebracht, man lässt die Enden vorstehen und schützt sie einstweilen mittels Band. Später werden die Enden untereinander und mit dem Strom-abgeber verbunden.

Ein unerfahrener Arbeiter kann die Verbindungen leicht unrichtig herstellen und eine linksgängige Wickelung anstatt einer rechtsgängigen und umgekehrt ausführen. Deshalb versieht man ihn zweckmässig mit einer Werkzeichnung, wie die Figur 226 darstellt. Dieselbe zeigt eine rechtsgängige Wickelung mit vier Windungen in jeder Abtheilung. Der mit *o* bezeichnete Draht ist das

1) Vergl. Journ. Instit. Electr. Engin., Bd. 19, S. 240. 1890.

letzte oder äussere Ende der vorhergehenden Abtheilung. Dieses Ende wird mit dem Stabe *a* des Stromabgebers verbunden, und von diesem Stabe geht der Anfang oder das linke Bodenende (mit *LB* bezeichnet) der Abtheilung aus. Man ersieht aus der Zeichnung, dass der Draht *LB* unter den Kern her zum andern Ende desselben laufen muss und dann oberhalb zurückkehrt und so die Windung 1 bildet. Er wird dann nach rechts herunter gebogen, wieder unterhalb durchgeführt und bildet dann die Windung 2, weiter die Windung 3; da nun aber der innere Raum enger als der äussere ist, so kommt die Nr. 4 jedenfalls auf oder zwischen die bereits gelegten Windungen zu liegen. Das rechte obere, mit *RT* bezeichnete Ende wird mit dem Stabe *b* des Stromabgebers verbunden. Wenn dem Arbeiter gezeigt wird, dass der rechte obere Draht einer

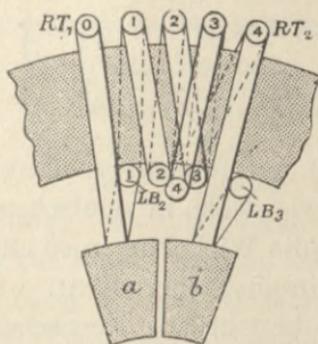


Fig 226. Darstellung der Wickelung eines Ringankers.

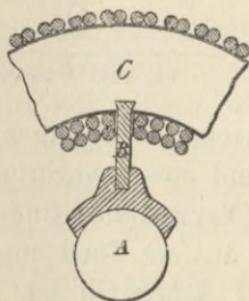


Fig. 227. Crompton's Drahtwicklung.

Abtheilung mit der linken untern Windung der nächsten Abtheilung am Stromabgeber in Verbindung zu bringen ist, so ist ein Irrthum ausgeschlossen. Eine andere Art der Wickelung mit zwei Drahtlagen innen und einer aussen zeigt die Figur 227. Die Herstellung der Wickelung vielpoliger Ringe ist bereits in den vorhergehenden Kapiteln erörtert worden.

Für Anker in Bogenlichtmaschinen und im Allgemeinen für solche Anker, die zahlreiche Drahtwindungen in jeder Abtheilung erhalten, bereitet man zweckmässig den Draht in bestimmten, für jede Abtheilung genügenden Längen vor, spult den Draht auf kleine Spulen, und zwar jedes Drahtstück auf zwei solcher Spulen auf, die dann abwechselnd für die aufeinanderfolgenden Lagen benutzt werden. Hierdurch werden beide Enden des eine Abtheilung bildenden Drahtes an die Aussenseite des Ankers gebracht, anstatt dass ein Ende des Drahtes in die innerste Lage, wie bei der Wickelung einer gewöhnlichen Spule, geräth.

Für solche Maschinen, für die nur eine oder zwei vollständige Windungen in jeder Abtheilung erforderlich sind, bereitet man gewöhnlich vorher die mit Band isolirten Kupferleiter auf besonderen Formen zu und streift sie dann über die Kerne. Crompton führte die in der Figur 228 gezeichnete Art der Leiter ein. Sie bestehen aus gezogenem Kupfer von fast rechteckigem Querschnitt und sind an den Ecken gedreht, so dass sie sich im Innern des Ringes dicht zusammenlegen. Diese Leiter werden über den Ringkern gebogen, erhalten zwischen sich eine geeignete Isolation und werden so miteinander verbunden, dass sie eine fortlaufende Wickelung bilden.

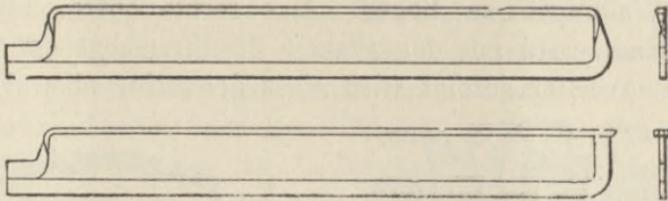


Fig. 228. Wickelung des Ankers von Crompton (1886).

In grossen vielpoligen Maschinen mit Ringanker, innerem Feldmagnet und äusserem Stromabgeber, wie solche in deutschen Centralstationen Verwendung finden, werden die Wickelungen so angeordnet, dass der äussere Theil zugleich als Stromabgeber dient, wie in der Tafel VIII dargestellt ist. Der Ring besteht aus Kernscheiben von segmentförmigen Platten, im Schnitt bei *b* in der Figur 229 dar-

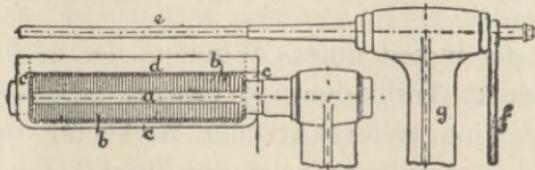


Fig. 229. Deutscher vielpoliger Ringanker.

gestellt, und wird von durchgreifenden Triebstücken *a* gehalten. Nachdem sie geeignet isolirt worden sind, werden die Kupferleiter *cd* übergeschoben und zu einer fortlaufenden Spiralwicklung verbunden. Die Isolation wird bei dieser von Siemens & Halske verwendeten Form aus zubereitetem Papier hergestellt.

Der äussere Theil *d* des Kupferleiters ist gleich stark wie breit und dient als Stab des Stromabgebers. Die (nicht gezeichneten) Bürsten werden auf einem vorragenden Stabe *e* befestigt und schleifen auf dem äusseren Umfange der Kupferwickelungen des Ringes. Bei *f* befindet sich ein Hebel, mittels dessen die Bürsten abgehoben werden können.

Trommelwicklung. Trommelanker aller Formen lassen sich als Abänderungen des bekannten Siemens'schen Ankers mit Längswicklung (1856) betrachten, bei dem die Wicklung in vielen Abtheilungen hergestellt wird, um den Strom gleichmässiger zu machen. Im Jahre 1872 wurde von Hefner-Alteneck bei der Firma Siemens & Halske ein besonderes Muster für Trommelanker erfunden. Ebenso wie bei dem Ring von Gramme die aufeinanderfolgenden Abtheilungen oder Spulengruppen, die sich auf dem Kern befinden, fortlaufend verbunden werden, wird bei dem System von Hefner-Alteneck das Ende einer Abtheilung und der Anfang der nächsten mit einem Stabe des Stromabgebers in Verbindung gebracht.

Es ist von Bedeutung, einen Unterschied zwischen dieser Anordnung und der Ringwicklung hervorzuheben. Bei einer Ringwicklung hängt die bei gegebener Geschwindigkeit in irgend einer Abtheilung erzeugte Spannung in Volt nur von dem magnetischen Felde auf der einen Seite des Ankers ab, bei der Trommelwicklung aber von den beiden magnetischen Feldern auf beiden Seiten des Ankers, weil jede Windung nahezu über dem Durchmesser der Trommel liegt. Es folgt daraus, dass Trommelanker ein geringeres Bestreben zur Funkenbildung zeigen, sie besitzen auch eine geringere Selbstinduction als Ringwicklungen.

Als Vortheile der Trommelform lassen sich ausserdem noch anführen:

1. Sie erfordern etwas weniger Draht als Ringwicklungen gleicher Grösse.
2. Sie sind frei von der Neigung zu falschen Inductionen und deshalb unabhängiger von der Form der Polstücke.
3. Sie besitzen geringere Neigung zur Quermagnetisirung als Ringanker.

Ihre Nachtheile dagegen bilden:

1. Grössere Schwierigkeit beim Aufbau.
2. Grössere Schwierigkeit, mit Rücksicht auf das Uebereinandergreifen der Leiter eine gute Isolation zu sichern.
3. Grössere Schwierigkeiten der Durchlüftung.
4. Grössere Schwierigkeiten bei Ausführung von Instandsetzungen.

Maschine von Siemens. In einigen älteren Formen der Maschinen von Siemens bestanden die Trommelkerne aus Holz, das an seinem Umfange mit Eisendraht übersponnen wurde, ehe man zur Auflegung der Längswicklungen schritt. In einer späteren Maschine von Siemens befand sich ein feststehender Eisenkern,

um den die hohle Trommel umlief, wieder andere Maschinen besaßen ausser der Triebwelle kein Eisen im Anker. Die Art des Aufbaues eines Ankers mit zwei Drahtlagen, wie solche bis zum Jahre 1885 ausgeführt wurde, ist in der Figur 230 dargestellt.

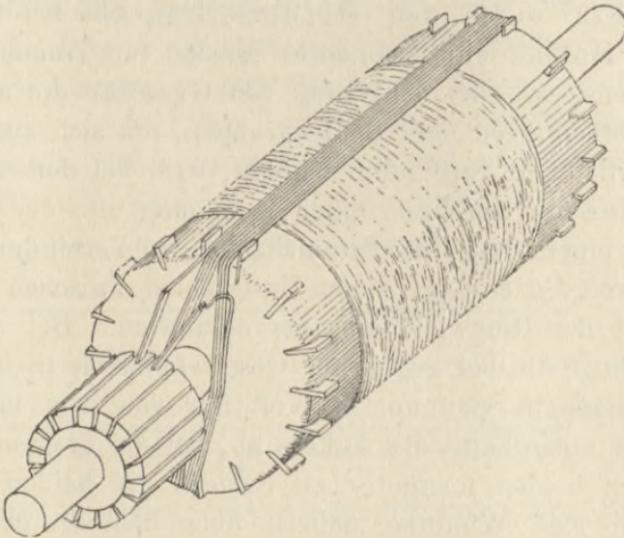


Fig. 230. Wickelung eines älteren Ankers von Siemens.

Um die Herstellung der Verbindungen leichter ersichtlich zu gestalten, befindet sich der Stromabgeber in der Figur bereits an seinem Platze. In der Praxis wird der letztere jedoch erst nach Herstellung aller Abtheilungen aufgebracht, die Enden der Drähte werden einstweilen zusammengebunden, bis sie mit den kupfernen Verbindungsstreifen verlöthet werden.

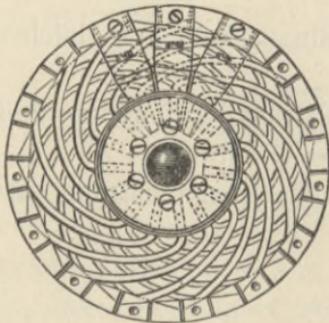


Fig. 231. Stabanker von Siemens.

Der Aufbau von Ankern mit Stabwicklung wird schon verwickelter, weil die Verbindung der Leiter an den Enden der Trommel nicht leicht ist. Nehmen wir an, dass ein Schema der herzustellenden Verbindungen und eine Wickelungstabelle bereits ausgearbeitet ist, dann bleibt noch

die mechanische Ausführung der Endverbindungen festzustellen. Die Endverbindungen müssen gute Leiter, genügend voneinander isolirt sein, Instandsetzungen und Lüftung zulassen und mechanisch stark sein. Mit Draht bewickelte Trommeln zeigen an den Enden oft eine hässliche Uebereinanderlagerung der Drähte, die eine Lüftung und Instandsetzung erschwert. Siemens erfand schon früh für Maschinen zu Metallniederschlägen eine Methode, die Kupferstäbe an

den Enden durch spiralgige Verbindungen zu vereinigen. Um einen Stab mit dem, der einem gegenüberliegenden zunächst sich befindet, zu verbinden, wurden zwei spiralgige Kupferstreifen verwendet, der eine nach innen, der andere nach aussen gebogen; die Verbindung wurde durch einen Holzblock auf der Welle mechanisch gesichert. Die äusseren Enden wurden durch Silberloth mit den Stäben ver-

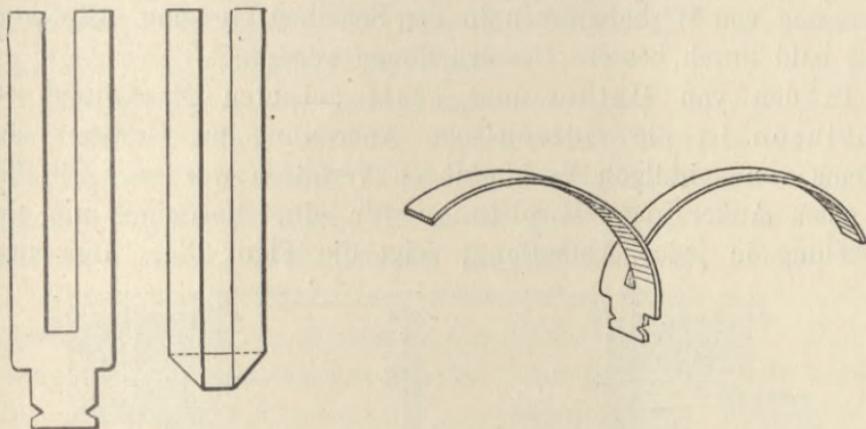


Fig. 232. Spiralgige Verbindungsstücke.

löthet. An jedem Ende der Trommel bildeten die spiralgigen Verbindungen zwei besondere Lagen (Fig. 231).

Diese spiralgigen Verbindungen finden sich mit grösserer oder geringerer Abänderung bei der Mehrzahl der neueren Trommelanker vor. Eine aus Kupferblech gestanzte, oft verwendete Form stellt

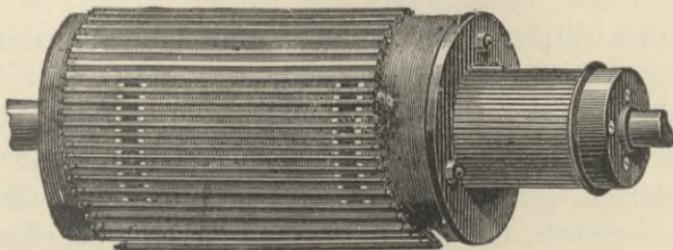


Fig. 233. Anker von Edison.

Figur 232 dar; eine andere Form wird aus gefalteten Blechstreifen hergestellt. Edison's abgeänderte Form der Trommelanker wurde schon auf Seite 244 erwähnt. Sie wurde bis zum Erlöschen der Siemens'schen Patente in Abhängigkeit von denselben hergestellt. In den Jahren 1883 bis 1885 baute Edison die Anker seiner grösseren Dynamomaschinen in der Weise, dass er massive Kupferstangen um die Peripherie eines Kernes herum anordnete, welcher aus dünnen, durch Glimmer oder Papier voneinander isolirten Blechscheiben besteht. Die Figur 233 stellt den aus der Maschine

genommenen Anker dar. Die Enden der Stäbe sind durch isolirte Bleche oder Scheiben von Kupfer miteinander verbunden; letztere haben zu diesem Zwecke entsprechende Ansätze. Derartige Scheiben besitzen weit geringeren Widerstand als Streifen.

Die Bauart ist mechanisch ausgezeichnet, lässt aber keine Lüftung zu, das Zerstreungsfeld an den Enden des Ankers ist zur Erzeugung von Wirbelströmen in den Scheiben geeignet. Sie wurde daher bald durch bessere Constructionen verdrängt.

In den von Mather und Platt gebauten Maschinen nach Hopkinson ist die Edison'sche Anordnung zu Gunsten eines Systems von spiralgigen Verbindungen verlassen worden. Die Bauart eines Ankers von Hopkinson für eine Maschine mit einer Wickelung in jeder Abtheilung, zeigt die Figur 234. Der gegen

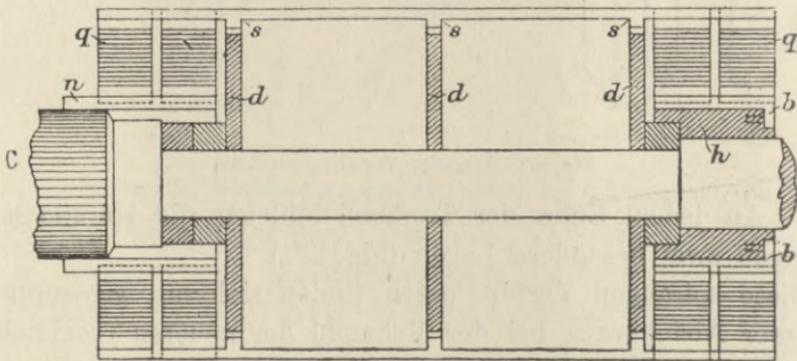


Fig. 234. Schnitt des Trommelankers von Hopkinson.

ein Ansatzstück auf der Welle gestützte Kern besteht aus zahlreichen Scheiben dünnen Eisens, jedoch sind einige stärkere Scheiben *dd* an den Enden und in Zwischenräumen eingesetzt. Sie werden durch Muttern, welche an dem einen Ende nahe dem Stromabgeber *C* sitzen, zusammengepresst. Die Kupferleiter sind mit isolirten Triebansätzen *ss* versehen, die in Nuthen der stärkeren Scheiben greifen. Die spiralgigen Verbindungen sind bei *qq* im Schnitt angedeutet. Am Ende des Stromabgebers verbinden sie die Leiter mit Kupferstücken *n*, die zu den entsprechenden Stäben des Stromabgebers führen. Am anderen Ende führen die Spiralen zu Kupferstücken *b*, die um eine Holznahe *h* angeordnet und mittels Ansätzen in dieser eingeschraubt sind. Bei Ankern, in denen jede Abtheilung aus zwei Windungen besteht, hat man vier Lagen Spiralverbindungen an jedem Ende anzubringen.

Crompton hat die Verbindungen an einem Trommelanker auf mancherlei Art versucht. Mit Swinburne hat er zur Verbindung

der Leiter auf einem Trommelanker eine Methode erfunden, die eine Durchlüftung des Kernes gestattet. Das Wesentliche dieser Bauart wurde in den früheren Ausgaben dieses Werkes bildlich dargestellt; es besteht darin, dass die Enden der Kupferstäbe radial umgebogen und mit spiraligen Streifen zur Verbindung mit den gegenüberliegenden Stäben versehen waren. Es ist dieselbe Verbindungsart, welche bei der Seite 232 erwähnten Sehnenwicklung von Swinburne angewendet wurde.

Die spiralförmigen Verbindungsleiter waren an der Seite des Ankers so angeordnet, dass ihre Enden sämmtlich auf einem inneren bezw. äusseren Kreise einer Ebene lagen, welche in einem bestimmten Abstände von der Endfläche des Ankers und dieser parallel lag. Die Ankerstäbe waren abwechselnd an die äusseren bezw. inneren Enden der Spiralen herangeführt. Die an die inneren Enden anschliessenden Ankerstäbe wurden zu diesem Behufe knieförmig gebogen. Die Verbindungsart mittels spiraliger Streifen kann auch mit einer kürzeren Sehne, als nach Swinburne's erwähntem System, angewendet werden. Die Methode unterscheidet sich von der bei den Maschinen für Metallniederschläge von Siemens angewendeten (Fig. 231) durch die Verwendung der knieförmigen Stücke.

Bei den grossen Trommelankern ist die Herstellung nach der Methode von Swinburne und Crompton verwickelter, insofern es nicht möglich wird, für die grosse Zahl von spiraligen Leitern in einem Kreise Platz zu finden. Dementsprechend sind zwei getrennte Lagen spiraliger Leiter vorhanden, deren vorstehende Theile an den Enden der Trommel abwechselnd lang und kurz gelassen werden. Die kurzen Enden werden dann durch eine Lage von Spiralen, die langen durch eine zweite miteinander in Verbindung gebracht. Einen in ähnlicher Weise hergestellten Anker zeigt die Figur 237.

Die Schwierigkeit, zu den inneren Spiralen bei der beschriebenen Bauart zu gelangen, wenn sie in zwei getrennten Lagen angeordnet sind, führte Crompton und Kyle zu einer andern Anordnung. Sie wandten die spiraligen Verbindungen auswärts anstatt einwärts an den Enden der Trommel an, die infolge dessen einen grösseren Durchmesser erhielt.

Die von Crompton gegenwärtig bei Trommelankern angewendete Methode ist in der Figur 236 dargestellt.

Bei diesem, für eine vierpolige Maschine bestimmten Trommelanker werden die spiraligen Verbindungen aus Kupferblech gestanzt. Sie werden an einer auf der Welle sitzenden Buchse befestigt.

Die Leiter bestehen aus Litzendraht, der zu rechteckiger Form zusammengedreht worden ist.

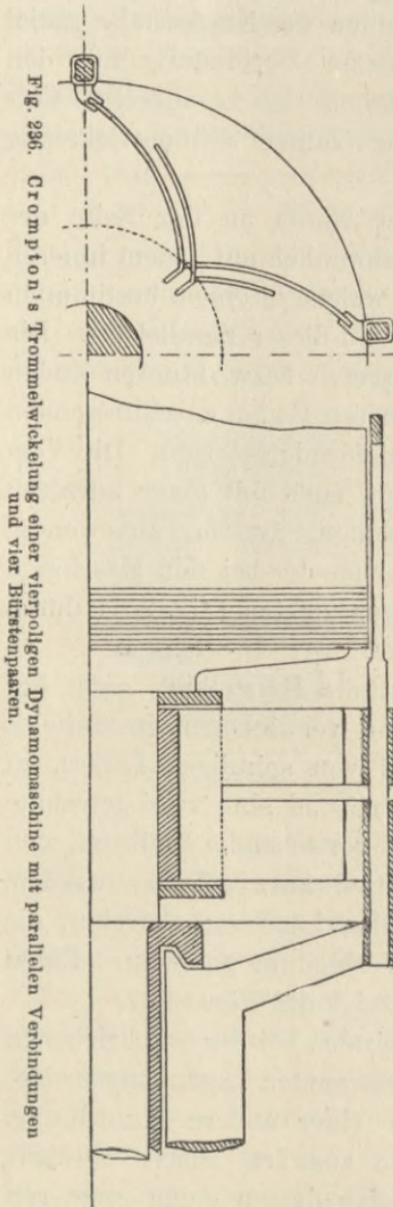


Fig. 236. Crompton's Trommelwicklung einer vierpoligen Dynamomaschine mit parallelen Verbindungen und vier Bürstenpaaren.

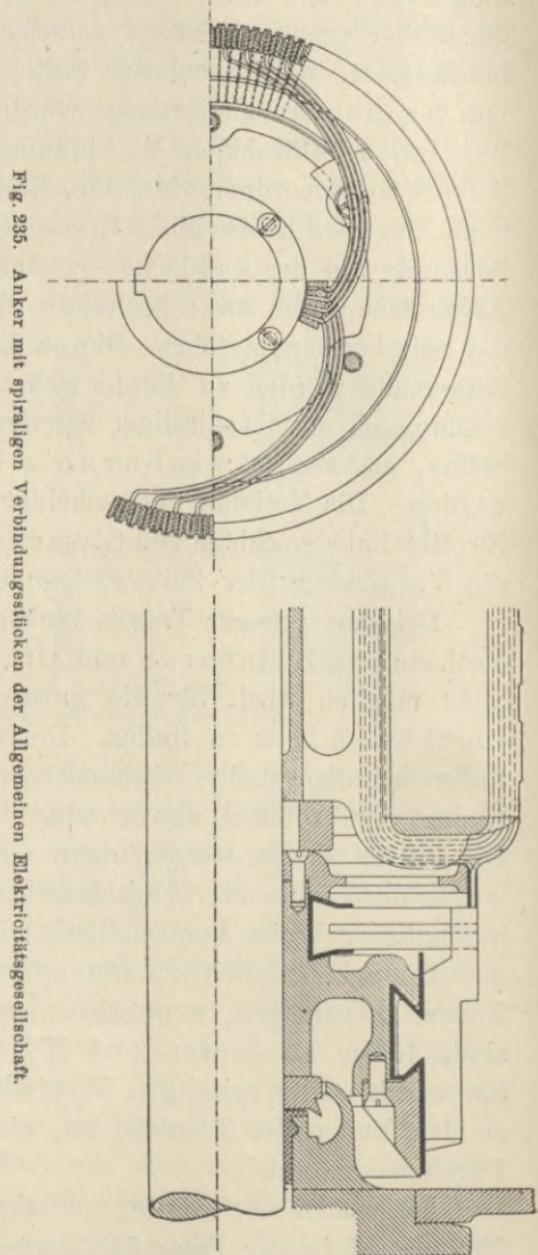


Fig. 235. Anker mit spiraligen Verbindungsstücken der Allgemeinen Electricitätsgesellschaft.

Figur 235 zeigt einen Anker mit spiraligen Verbindern, wie ihn die Allgemeine Electricitätsgesellschaft neuerdings baut.

Einen neuerdings von der Oerlikongesellschaft gebauten Anker zeigt Figur 237. Er gehört zu einer 60 Kilowatt-Maschine, die später noch beschrieben wird, und ist ein gutes Beispiel eines vierpoligen Trommelankers mit spiraligen Verbindungen. Die Kernscheiben haben geradflankige Zähne, zwischen denen die Leiter paarweise gelagert sind.

Auf die Methode von Paris und Scott gründet sich eine von Kapp für zweipolige und vielpolige Trommeln verwendete Methode. Die Verbindungsstücke werden aus Kupferblech halbkreisförmig oder in Quadrantenbogen gestanzt und mit Ansätzen versehen (vergl. Tafel II, Fig. 2), von denen der eine vorwärts, der andere rückwärts gebogen wird. Dies ermöglicht die Herstellung der Verbindungen

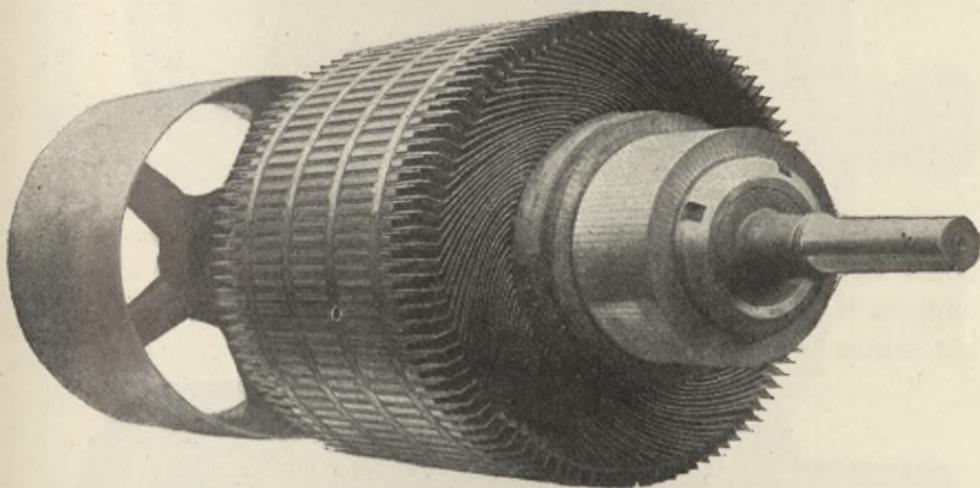


Fig. 237. Vierpolige Trommelwicklung der Oerlikongesellschaft.

mittels einer ganzen Reihe solcher Leiter, die in einer auf der Welle befindlichen Hülse schraubenförmig angeordnet sind. Die Verbindungsstücke werden zu der passenden Anzahl vereinigt und mit Bindedrähten in dem Kanal dieser Hülse gehalten. Letztere wird aufgesetzt, und die Ansätze werden in Ausschnitten, die in den Enden der Ankerleiter angebracht werden, mit diesen verlöthet. Die Leiter sind zu diesem Zwecke abwechselnd lang und kurz gelassen. Das beste Verständniss dieser Methode erlangt man durch Herstellung einiger Leiter aus Papier oder Pappe und Uebereinanderlegung derselben.

Die Methode von Eickemeyer, welche viel in den Vereinigten Staaten angewendet ist, auch in England von Parker, ist von der vorhergehenden verschieden und sowohl für Trommeln mit Draht-

bewickelung als auch für solche mit Streifenbewickelung anwendbar. Jede Abtheilung, möge sie aus vielen Windungen oder nur aus einer Windung bestehen, wird zuerst auf einer besonderen Form fertig gestellt, besonders isolirt, und dann an ihren Platz auf dem Trommelkern gebracht. Die Figur 238 zeigt die Form der Abtheilungen.

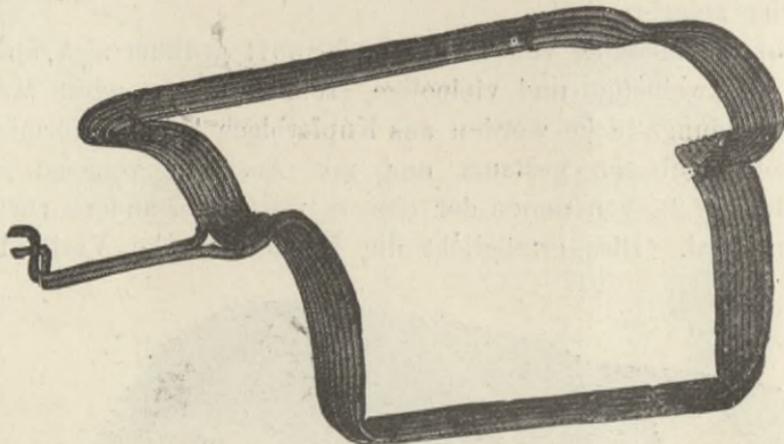


Fig. 238. Abtheilung eines Ankers von Eickemeyer.

Der untere Theil bildet einen Theil einer inneren Lage, der obere längere Theil bildet einen Theil einer äusseren Lage der vereinigten Wickelungen. In der Figur 239 ist der vollständige Anker mit seinen Bindedrähten dargestellt.

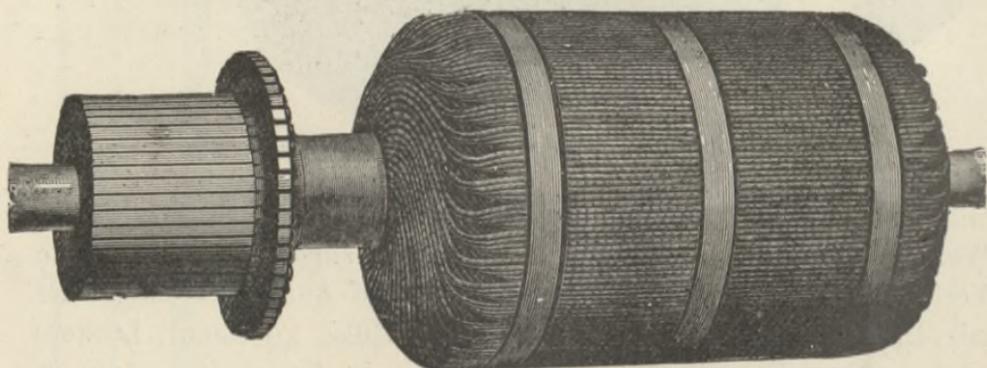


Fig. 239. Anker von Eickemeyer.

Ein Trommelanker mit Schablonenwickelung der Allgemeinen Elektrizitätsgesellschaft in Berlin ist in Figur 240 dargestellt.

Die Leiter sind hierbei an ihren Enden ausgereckt und gebogen und bilden so eine Fortsetzung der cylindrischen Trommeloberfläche, welche an beiden Enden über den Kern vorragt. Es hat diese Anordnung den Vorzug guter Lüftung und leichter Zugänglichkeit. Eine ähnliche Art der Verbindung wird von Brown

seit 1892 angewendet, nicht nur für Trommelanker, sondern auch für versenkte Wicklungen bei Wechselstrommaschinen und die rotirenden Theile aller Wechselstrommotoren, sowohl ein-, als auch mehrphasige, welche Windungen tragen. Auch die Westinghousegesellschaft und die General Electric Co. wenden sie an.

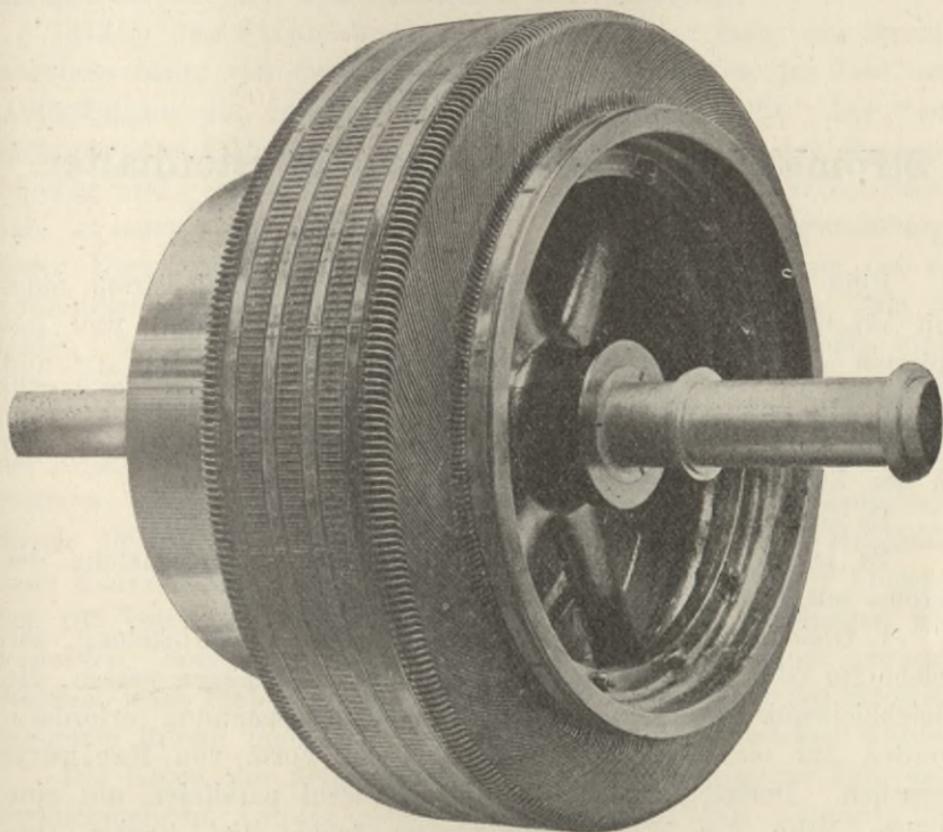


Fig. 240. Anker mit Schablonenwicklung der Allgemeinen Elektrizitätsgesellschaft.

Brown verwendet zwei Lagen von Leitern, die in Löchern der Kernscheiben liegen. Die Enden der äusseren Lage sind nach der einen Seite, die der inneren nach der entgegengesetzten Seite umgebogen. Aus Tafel VII ist zu erkennen, dass diese vorstehenden cylindrischen Enden durch innere Flanschen unterstützt werden, welche an den kräftigen Endplatten der Kerne befestigt sind.

Kapitel XIV.

Stromabgeber, Bürsten und Bürstenhalter.

Eine Dynamomaschine zur Erzeugung von Gleichstrom muss mit einem Stromwender (auch Stromsammeler genannt) und mit Bürsten zur Abnahme der Ströme versehen werden. Die Art und Weise, wie diese Theile wirken, ist schon früher beschrieben worden; auch die Ursachen, die zur Funkenbildung Anlass geben, finden sich in den Kapiteln IV und XVI erläutert.

Es soll nun die Bauart dieser Theile erörtert werden.

Es lassen sich drei Stromabgeberformen zur Aufnahme der Ströme aus Dynamomaschinen unterscheiden:

1. Gleichstrommaschinen mit geschlossener Ankerwicklung, wie solche für Glühlichtbeleuchtungen und anderen Anlagen passen, die gleichbleibende oder nahezu gleichbleibende Spannung erfordern, werden mit einem Stromabgeber nach der Form von Pacinotti versehen. Derselbe besteht aus einer Anzahl paralleler, um eine isolirte Nabe der Welle angeordneter Stäbe und besitzt eine cylindrische Oberfläche, gegen die ein Paar (oder auch zuweilen mehr als ein Paar) Bürsten oder Bürstensätze anliegen.

2. Gleichstrommaschinen mit offener Ankerwicklung, wie solche für Bogenlicht verwendet werden und einen gleichbleibenden oder nahezu gleichbleibenden Strom liefern, werden mit einem Stromabgeber versehen, der aus einer verhältnissmässig geringen Anzahl von Stäben besteht. Jeder Stab füllt einen beträchtlichen Winkel aus und ist von dem benachbarten durch Luftzwischenraum getrennt. Im Kapitel XVIII findet sich die nähere Beschreibung.

3. Wechselstrommaschinen mit umlaufendem Anker erfordern ein Paar metallischer Sammelringe, von denen jeder mit einer oder mehreren Bürsten oder mit einer Vorrichtung, die eine gleitende Verbindung mit dem Stromkreise herstellt, ausgestattet ist. Wechsel-

strommaschinen mit umlaufenden Feldmagneten haben eine ähnliche Vorrichtung nothwendig, um den erregenden Strom zu den umlaufenden Wickelungen zu leiten. Diese Vorrichtungen werden am Schlusse dieses Kapitels behandelt werden, das sich übrigens in der Hauptsache mit der erstgenannten Klasse beschäftigt.

Stäbe des Stromabgebers. Die Zahl der Stäbe des Stromabgebers hängt von dem Wickelungsschema und von der Zahl der Abtheilungen ab, in die die Ankerwicklung zerfällt. Die Vermehrung der Stäbe wirkt im Sinne einer Abnahme der Funkenbildung und vermindert die Stromschwankungen. Eine gerade Stabzahl ist einer ungeraden vorzuziehen. Für Anker mit Ringwicklung, deren Kerne in der Regel an drei Speichen befestigt sind, ist es vortheilhaft, wenn die Stabzahl ein Vielfaches von der Zahl 3 bildet. Es sprechen indessen zwei Gründe der Praxis gegen eine allzu grosse Vermehrung der Anzahl Stäbe. Zunächst erhöhen sich die Kosten. Ferner ist bei grossen Maschinen, die nur eine Windung der Ankerwicklung von einem zum andern Stabe des Stromabgebers besitzen, die Zahl der Stäbe des Stromabgebers im Wesentlichen durch die geforderte Spannung gegeben. Z. B. in einer Maschine nach Edison-Hopkinson, die für eine Leistung von 1100 Ampere bei 105 Volt Spannung bestimmt ist, sind nur 43 Windungen erforderlich. Sodann wird bei kleinen Maschinen bei einer grossen Stabzahl jeder Stab so dünn, dass eine zum Abnehmen des Stromes geeignete Bürste mehr als zwei Stäbe zugleich überbrücken würde.

Die Länge der Stäbe sollte auch im Verhältniss zur Zahl der abzunehmenden Ampere stehen. Die neuere Praxis schwankt in dieser Beziehung etwas, es kann aber als Regel gelten, dass für je 100 Ampere eine Länge von etwa 3 cm genommen wird.

Die Art der Befestigung der Stäbe sollte derart sein, dass sie eine möglichst grosse Länge nutzbar macht. Auch sollten die Stäbe eine beträchtliche radiale Tiefe besitzen, um ein Abdrehen zu gestatten, was für den Stromabgeber zur Erhaltung der cylindrischen Form von Zeit zu Zeit erforderlich wird. Als Material wird meistens hartgezogenes Kupfer benutzt. Dasselbe wird mit dem erforderlichen Querschnitt in grösseren Längen hergestellt und in passende Stücke geschnitten. In Amerika benutzt man zuweilen Schmiedestücke aus Kupfer mit Ansätzen zur Befestigung und Verbindung der Wickelungen. Stromwender für Kohlenbürsten müssen $1\frac{1}{2}$ bis 2 mal so gross gemacht werden als für Kupferbürsten erforderlich wäre, denn Kohlenbürsten brauchen (bei gleicher Stromstärke) eine grössere

Berührungsfläche, sie sollen jedoch, abgesehen von den Specialfällen der Duplex- und Triplexanker, nicht mehr als zwei Segmente gleichzeitig berühren.

Isolation. Jeder Stab muss von den benachbarten Stäben gut isolirt sein und besonders gut von der Buchse oder Nabe, auf der die Stäbe befestigt werden; ebenso muss Isolation zwischen den zur Befestigung der Stäbe dienenden Vorrichtungen und den Stäben vorhanden sein; denn die Potentialdifferenz zwischen benachbarten Stäben ist gering, jedoch viel erheblicher zwischen den Stäben und anderen Metalltheilen. Das Isolationsmaterial darf Oel oder Feuchtigkeit nicht anziehen, deshalb ist Asbest und Gyps nicht zulässig. Pressspahn und Willesden-Papier sind aus diesem Grunde ebenfalls

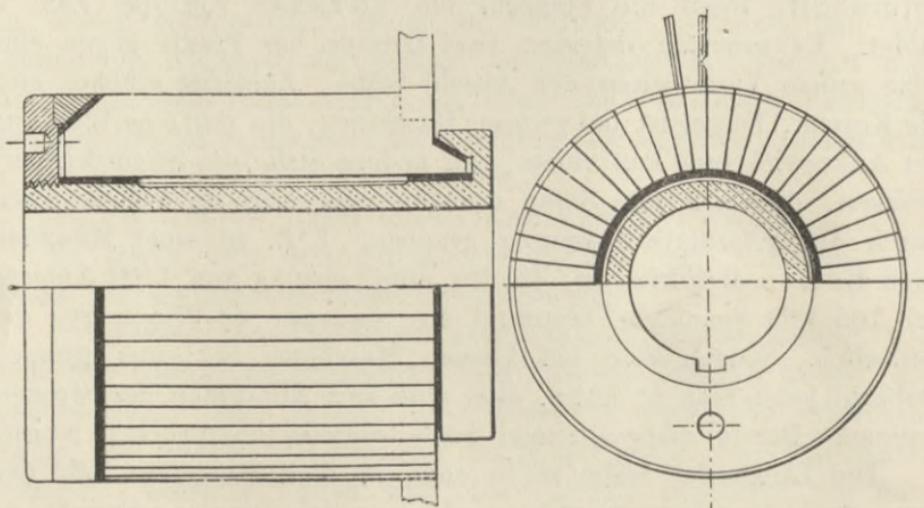


Fig. 241. Stromabgeber der Maschine von Paterson und Cooper.

nicht besonders geeignet, obwohl mechanisch haltbar, da sie leicht Feuchtigkeit absorbiren. Glimmer ist das beste Material, für Maschinen in trockenen Räumen wird indes oft auch präparirtes Papier verwendet. Zuweilen findet man Zwischenlagen von konischer Form, welche aus dünnen Glimmerstücken zusammengesetzt und mit Schellack als Bindemittel meist unter hohem Druck zusammengepresst sind. Zwischen den Stäben kann der Glimmer sehr dünn sein. Stromabgeber mit Luftzwischenräumen zwischen den Stäben sind oft verwendet worden, aber es ist dabei schwierig, die Zwischenräume von dem Metallstaub frei zu halten, der durch Abnutzung der Bürsten entsteht.

Bau der Stromabgeber. Die Figur 241 zeigt eine Bauart, bei welcher die Stäbe dadurch an ihrer Stelle befestigt werden, dass

sie mit dem einen Ende in eine Vertiefung einer Buchse aus Rothguss eingepasst, am anderen Ende durch einen Ring gehalten werden, der über die konischen Enden greift und seinerseits durch eine

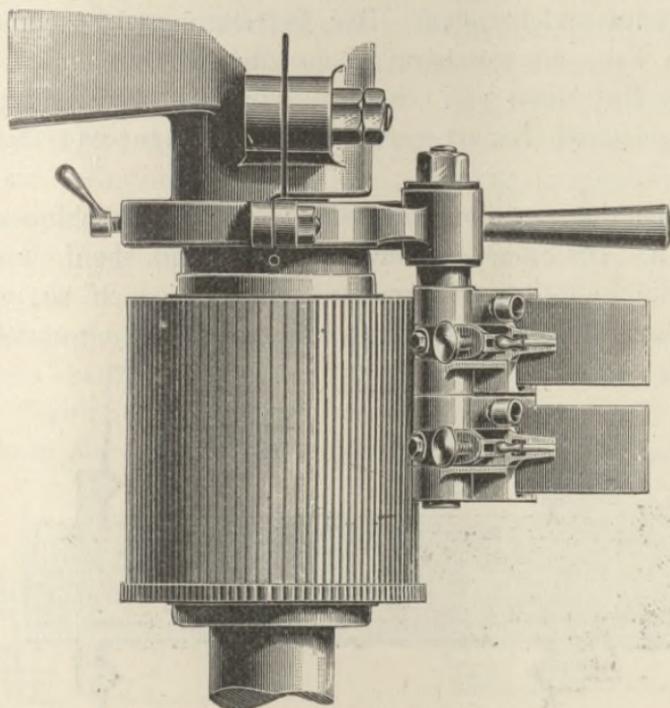
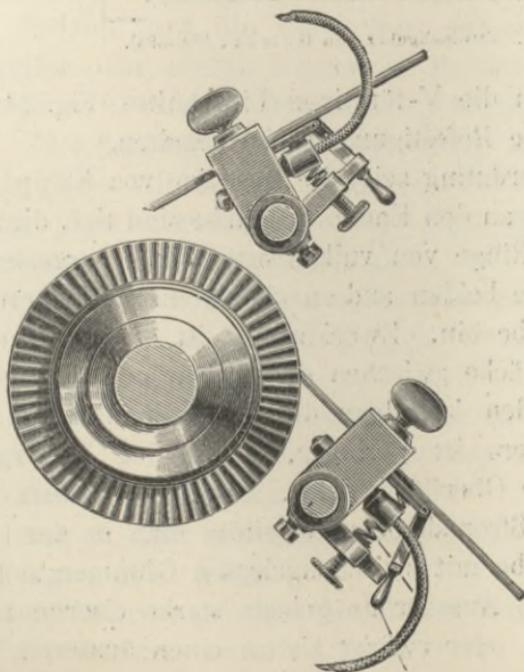


Fig. 242 und 243. Stromabgeber und Bürstenhalter der vierpoligen Maschine von Gülicher.



aufgeschraubte Mutterscheibe gehalten wird. Als Isolationsmaterial dienen dünne Glimmerscheiben zwischen den Stäben, sowie Lagen von Glimmer und Presspahn um die Buchse und die Oberfläche der Befestigungsvorrichtungen. Der Befestigungsring schmälert im vorliegenden Falle die nutzbare Fläche für die Bürsten.

Bei den Maschinen von Gülcher wird die in den Figuren 242 und 243 gezeichnete Bauart verwendet. Die Figur 244 stellt einen Schnitt dar.

Die Zeichnungen gelten für eine vierpolige Maschine mit zwei Bürstensätzen. Die Stäbe des Stromabgebers sind ebenfalls um eine auf der Welle befestigte Buchse angeordnet, jedoch so, dass die ganze Stablänge für die Berührung mit den Bürsten nutzbar bleibt.

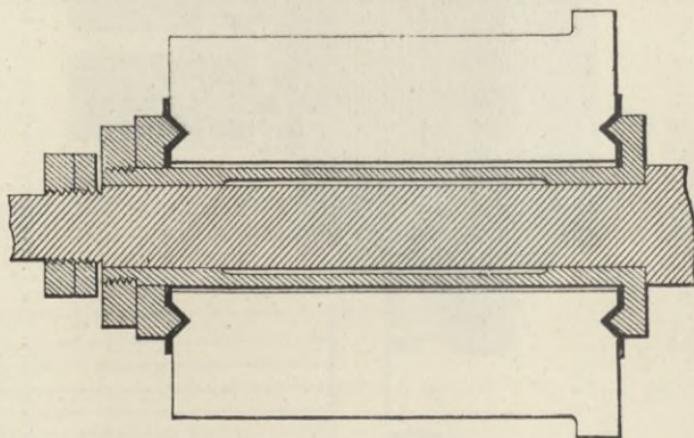


Fig. 244. Stromabgeber von Gülcher (Schnitt).

An den Enden werden die V-förmigen Einschnitte (Fig. 244) isolirt und durch eingreifende Befestigungsstücke gehalten.

Eine ähnliche Anordnung zeigt die Maschine von Kapp (Tafel II, Fig. 1); die Einschnitte an den Enden der Stäbe sind tief, die Isolation wird hier durch drei Ringe von vulkanisirter Fiber hergestellt. Der eine Ring ist flach, die beiden andern sind konisch, letztere greifen in die Enden der Stäbe ein. Zweckmässig ist es, wenn eine hinreichende isolirende Fläche zwischen den Stäben und den metallenen Befestigungen vorhanden ist, denn die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten eines Fehlers ist geringer, wenn der Uebergangsweg über eine beschmutzte Oberfläche lang, als wenn er kurz ist. Bei der Herstellung eines Stromabgebers vereinigt man in der Regel die passende Zahl der Stäbe mit zwischengelegten Glimmerstücken, hält sie durch eine um die Aussenseite gelegte starke eiserne Klammer-vorrichtung zusammen oder zwingt sie in einen äusseren Stahlring

durch hydraulischen Druck ein. Dann bringt man die vereinigten Stäbe auf die Drehbank und bohrt auf dieser die innere cylindrische Oberfläche aus. Die Enden werden nunmehr abgedreht und mit den Einschnitten zur Aufnahme der Befestigungsvorrichtung versehen. Darauf wird das Ganze isolirt auf der Buchse befestigt, und die Befestigungsstücke werden aufgeschraubt. Demnächst erhitzt man den Stromabgeber und zieht die Vorrichtungen zur Befestigung der Enden stärker an. Endlich werden die zeitweise umgelegten äusseren Klemmenstücke oder Ringe abgenommen, und die äussere Oberfläche wird sauber abgedreht. Die Buchse muss gut aufgekeilt oder sonst in geeigneter Weise mit der Welle verbunden werden, damit sie sich nicht gegen den Anker, mit dem sie später verbunden wird, verschieben kann. Bei sämtlichen zuletzt abgebildeten Formen wird die Verbindung mit den Ankerleitern durch Kupferstreifen bewirkt, die in einen, in jedem Stabe angebrachten Einschnitt eingefügt

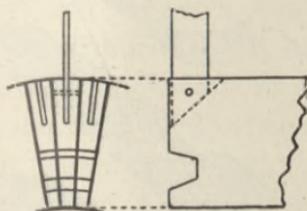


Fig. 245.

Befestigung radialer Verbindungsstreifen.

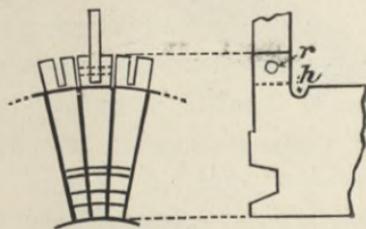


Fig. 246.

werden. Sodann wird die Verbindung mit den Ankerleitern durch Kupferstreifen oder -drähte hergestellt, welche in Einschnitte, die an der Ecke jedes Stabes angebracht sind, eingelegt und dort befestigt werden. Zweckmässig ist die Vernietung der Kupferstreifen mit dem Ende jedes Stabes vor Zusammensetzung der Stäbe und die Verlöthung jeder Verbindungsstelle. Figur 245 zeigt eine solche Befestigungsart; Figur 246 eine andere, bei welcher die Stäbe mit Vorsprüngen versehen sind, durch welche die Niete *r* gehen.

Die Verbindungsstreifen müssen gut festgelegt werden, weil sie einem beträchtlichen mechanischen Angriff unterliegen. Bei jeder Umdrehung des Ankers leitet jeder Streifen zweimal einen Strom, und durch das vorhandene zerstreute magnetische Feld wird der Streifen nach einer Seite hingezogen.

Ehe man zu dem Verständniss dieser Thatsache gelangte, waren Beschädigungen nicht selten.

Vielfach besitzen grössere Maschinen keinen besonderen Stromabgeber, die Bürsten schleifen gegen einen Theil der Ankerleiter

selbst. Dies ist z. B. der Fall bei der grossen Maschine von Siemens (Tafel VIII und Figur 229).

Bürsten. Die am häufigsten zur Stromabnahme benutzte Bürste besteht aus gewebter Kupferdraht-Gaze, welche mehrfach zusammengefaltet und dann zusammengepresst ist, wie Figur 247 *e* zeigt. Sie wurde vor etwa fünfzehn Jahren von Trotter eingeführt. Um das Ausfransen zu hindern, wird die Gaze gewöhnlich schräg gefaltet, wie bei *f* derselben Figur. Zuweilen wird der Kern dieser Gaze aus ausserordentlich feinen Kupferdrähten hergestellt, die entweder gerade oder leicht gewellt sind. Die zuerst angewendete Bürstenart bestand aus einer Anzahl gerader nebeneinanderliegender Kupferdrähte, die an einem Ende zusammengelöthet und in einer entsprechenden

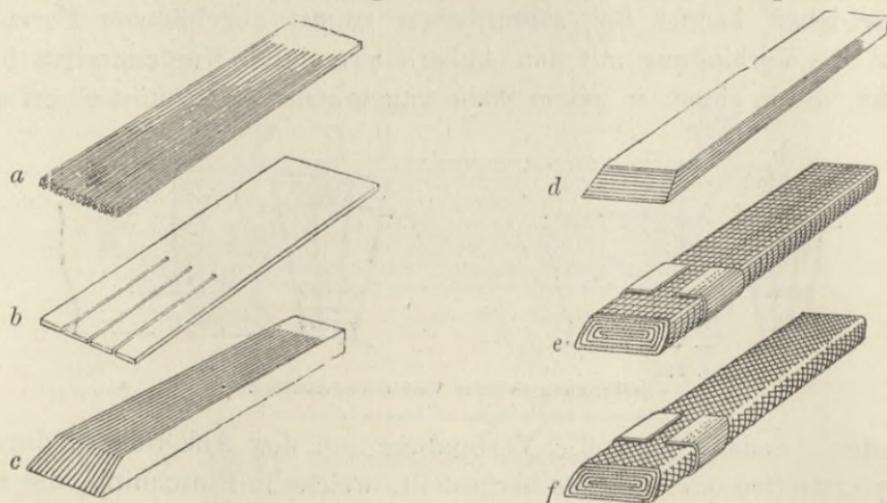


Fig. 247 *a, b, c, d, e, f.* Verschiedene Bürsten.

Klammer befestigt wurden. Zwei Lagen Drähte werden häufig zu einer Bürste vereinigt, wie Figur 247 *a* zeigt. Der Zweck aller dieser Einrichtungen war, an möglichst vielen Punkten einen sicheren Contact zu erreichen.

Auch werden Bürsten von breiten Streifen elastischen Kupfers gefertigt, das auf eine kurze Strecke geschlitzt wird, um die Berührung an mehreren Punkten herbeizuführen (vergl. Fig. 247 *b*). Derartige Bürsten werden bei Maschinen von Brush und Thomson-Houston benutzt. Sie werden gewöhnlich tangential gegen die Oberfläche des Stromabgebers gelegt, nicht schräg in einem Winkel gegen denselben, wie dies bei den stärkeren Bürstenarten der Fall ist.

Edison benutzte eine Anzahl Kupferstreifen, die mit der Kante gegen den Stromabgeber gestellt und mit den flachen Seiten an dem vom Stromabgeber abgewendeten Ende zusammengelöthet

wurden (vergl. Fig. 247 *c*). In einigen Maschinen von Edison wird eine zusammengesetzte Bürste verwendet, abwechselnd aus Drahtlagen, wie in Figur 247 *a* und geschlitzten Kupferstreifen, wie in Figur 247 *c*, gefertigt.

Andere verwenden eine Anzahl sehr dünner übereinandergelegter Kupferstreifen (Fig. 247 *d*), die mit einer passenden Klammer zusammengehalten werden. Umlaufende Bürsten in Form von Walzen oder Scheiben wurden wiederholt versucht, haben sich aber nicht bewährt.

Von G. Forbes¹⁾ ist der Vorschlag gemacht worden, die Bürste durch eine Platte feinkörniger, gut leitender Kohle zu ersetzen. Bürsten aus Kohle werden sowohl für Stromerzeuger als auch für Triebmaschinen häufig benutzt. Man rechnet gewöhnlich einen Querschnitt von 1,3 qcm auf je 10 Ampere Strom, jedoch kann man bei besonders gut leitender Kohle bis zur doppelten Belastung gehen. Kohlenbürsten nutzen den Stromabgeber weniger ab als solche von Kupfer und verhüten besser die Funkenbildung, aber sie leiden mehr bei Erhitzung und bedingen grössere Stromabgeber.

Bei allen Maschinen (abgesehen von sehr kleinen) bringt man mindestens zwei Bürsten nebeneinander an anstatt einer breiten Bürste, vergl. Figur 250. Dadurch wird es möglich, während des Betriebes der Maschine jede Bürste behufs der Reinigung oder Auswechslung abzunehmen. Auch wird eine gleichmässige Abnutzung des Stromabgebers erzielt, da jede Bürste für sich gegen die Oberfläche drückt, und der Zwischenraum zwischen zwei Bürsten auf der einen Seite durch die Bürsten der andern Seite überdeckt werden kann. Eine Regel für die Zahl oder Breite der Bürsten lässt sich nicht allgemein aufstellen. Einige rechnen 2,5 cm Bürstenbreite für je 100 Ampere Strom. Auch in Bezug auf die Stärke der Bürsten lässt sich nicht leicht eine Regel geben. Eine Stärke, wodurch der isolirende Zwischenraum zwischen je zwei Stäben überbrückt wird, ist nicht hinreichend, denn jede Abtheilung der Wicklung muss während einer bestimmten geringen Zeitdauer kurz geschlossen werden, damit der Strom in der Abtheilung umgekehrt wird. Die geringste Stärke der Bürste (oder der Stärke des schrägen Endes) scheint das 1½ fache der Breite eines Stabes des Stromabgebers betragen zu müssen.

Bei Dynamomaschinen, die eine grosse neutrale Zone am neutralen Punkt besitzen oder in denen die Inductionscurve (Fig. 66) ein

1) Specif. of Patent [1885], Nr. 1288.

breites flaches Obertheil aufweist, liegen keine Bedenken gegen eine bedeutendere Stärke der Bürsten vor. Werden solche Bürsten benutzt, so tritt indessen eine andere Wirkung auf, nämlich ein Verlust durch Wärmebildung wegen der Potentialdifferenz zwischen den Theilen des Stromabgebers, die mit der vorderen und hinteren Kante der Bürste in Berührung gelangen. Zur Verminderung dieser Wirkung ist die Anwendung zweier hintereinanderliegender Bürsten vorgeschlagen worden, anstatt einer einzigen starken Bürste, und zwar soll ein gewisser Widerstand zwischen den beiden Bürsten sich befinden. Bei Ankern mit doppelter und dreifacher Wickelung (vergl. Seite 254 u. f.) müssen nothwendigerweise breitere Bürsten zur Anwendung kommen.

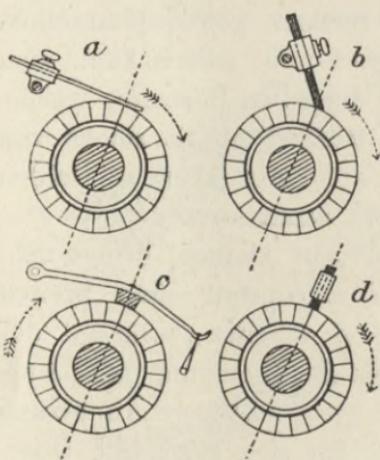


Fig. 248 a, b, c, d.
Verschiedene Bürsten.

Der Winkel, unter dem die Bürsten gegen den Stromabgeber anliegen müssen, ist je nach der Bauart verschieden. Als Regel gilt, die Bürste unter einem solchen Winkel anzulegen, dass die Spitze der Bürste in der Richtung der Bewegung so liegt, dass sie an den Kanten der Stäbe des Stromabgebers nicht hüpfet.

Die Figur 248 a zeigt eine Bürste, wie sie in der Figur 247 b dargestellt ist, und die, wie bei Bogenlichtmaschinen, tangential anliegt.

Die Figur 248 b stellt eine Bürste mit schräg zugerichtetem Ende unter einem Winkel von 45 Grad dar; diese Stellung findet man bei den meisten Maschinen für Gleichspannung. Die Figur 248 c stellt eine von Holroyd Smith für Elektromotoren erfundene Bürste dar, die eine Umkehrung der Umlaufsrichtung des Ankers zulässt. Stäbe aus Kupfer oder Rothguss werden zu diesem Zwecke an Hebeln befestigt, die von Gummibändern zur Erzielung eines festen Anliegens gehalten werden. Die Figur 248 d stellt eine Bürste aus Kohle dar, bei welcher ebenfalls eine Umkehrung der Umlaufsrichtung des Ankers zulässig ist. Die Bürste besteht aus einem rechteckigen Kohlenblock, der radial durch einen Metallschlitten hindurch gegen den Stromabgeber angedrückt wird.

In manchen Fällen, in denen Bürsten aus Kohle verwendet werden, neigt man sie entgegengesetzt zur Richtung des Umlaufes, so dass der Druck an den Enden beim Umlauf sich erhöht. Die Figur 249 zeigt die Gestalt eines Bürstenhalters für eine solche Bürste aus Kohle.

Bürstenhalter und Bürstenhebel. Die Vorrichtung zum Festhalten der Bürsten muss gewissen mechanischen und elektrischen Bedingungen entsprechen, die in Folgendem zusammengestellt sind:

1. Die Bürsten müssen recht fest gehalten werden und in guter metallischer Berührung mit dem Stromkreise stehen;
2. die Bürstenhalter müssen das Zurückziehen und Vorwärtschieben der Bürsten nach Bedarf zulassen;
3. die Bürsten müssen so gehalten werden, dass sie unter dem geeigneten Winkel mit dem Stromabgeber in Berührung stehen;
4. die Bürsten müssen unter geeignetem Druck gegen den Stromabgeber anliegen; ist der Druck zu gering, so hüpfen sie, und

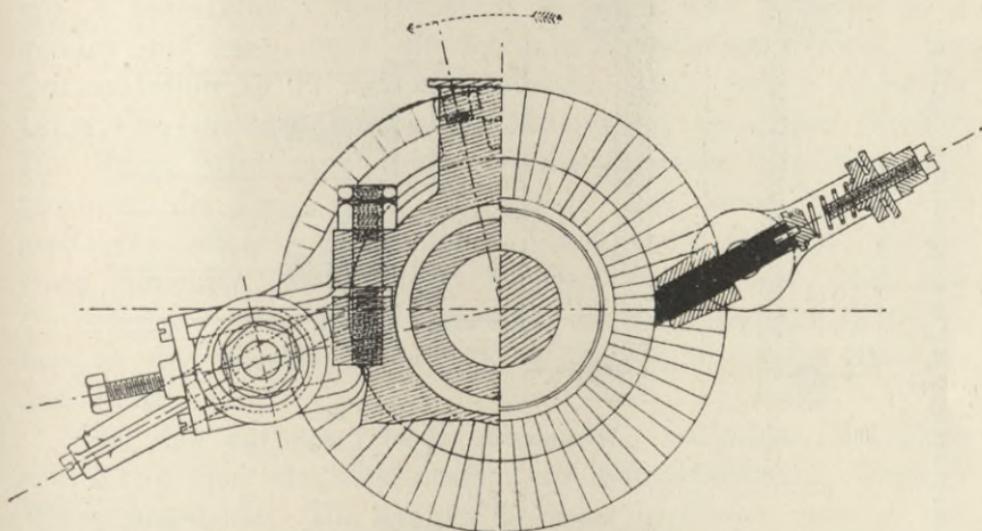


Fig. 249. Bürstenhalter für Kohlenbürsten.

es entstehen Funken; ist der Druck zu stark, so wird deren Stromabgeber zu stark abgenutzt;

5. die Bürstenhalter müssen das Abheben der Bürsten zulassen;
6. die Bürstenhalter müssen mit einer besonderen Haltevorrichtung versehen sein, um die Bürsten dauernd ausser Berührung mit dem Stromabgeber halten zu können;
7. bei allen Dynamomaschinen für eine Spannung von über 100 Volt sollten die Bürstenhalter mit isolirenden Handhaben versehen sein, die das Anlegen oder die Regulirung der Bürsten gestatten, ohne dass man einen elektrischen Schlag befürchten muss;
8. die Isolirung der Bürsten allein oder der Bürsten mitsammt dem Bürstenhalter muss sehr gut sein.

Die Dynamomaschine der Gülcher Company, Figur 243, zeigt ein charakteristisches Beispiel von Bürstenhaltern. Die Maschine ist vierpolig (quer verbunden) und aus diesem Grunde müssen die

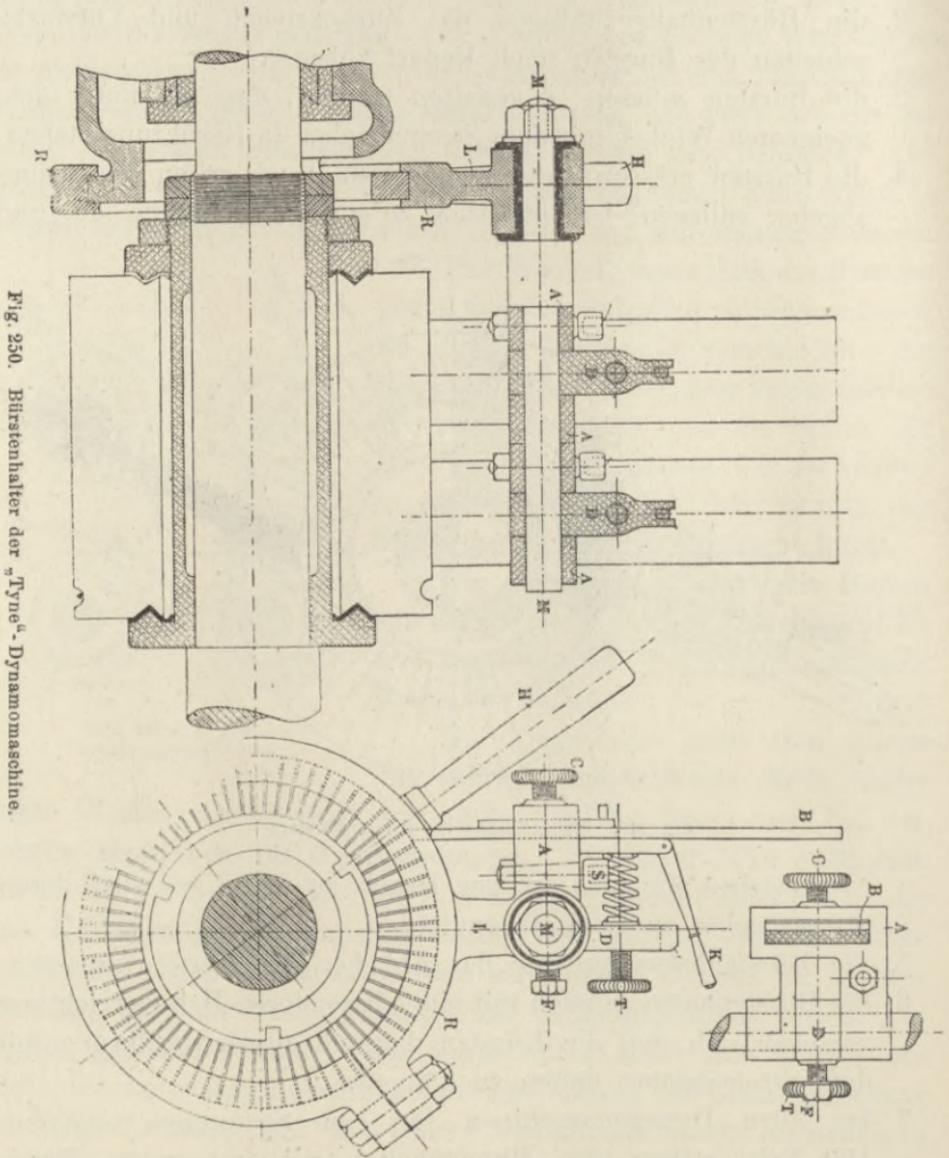


Fig. 250. Bürstenhalter der „Tyne“-Dynamomaschine.

beiden Bürsten 90 Grad voneinander entfernt liegen. Ein ähnliches Beispiel bietet die Tyne-Dynamomaschine von W. C. Mountain; vergl. Figur 250, wo auch die Bauart des Stromabgebers und des Bürstenhebels gezeigt wird. Der Hebel besteht aus einem

zweitheiligen schmiedeeisernen Ringe; die Theile werden durch Bolzen zusammengehalten. An dem Ringe befindet sich eine Handhabe H , um die Bürsten bis zum neutralen Punkt verschieben zu können, und ein Paar vorragende Ansätze L (nur einer ist sichtbar), um die Stäbe M des Bürstenhalters zu tragen. Die letzteren werden mittels Schrauben festgelegt. Vor der Berührung mit dem Halter werden die Stäbe M durch Zwischenfügung einer isolirenden Buchse und Scheiben aus Ebonit gesichert. An den Stäben M sind die Bürstenhalter A angebracht, die sich wie in Gelenken drehen lassen. Mittels einer Schraube F wird das mit einem vorstehenden Arm versehene Mittelstück D in dem Gelenk von A festgehalten. Die Bürste B ist durch eine Oeffnung in A geführt und kann durch die Schraube C festgelegt werden. Die Leitungszuführung zu den Bürstenhaltern erfolgt mittels biegsamer Leiter, die in dazu bestimmten Vertiefungen eingelöthet werden. Die Bürste wird durch eine zusammengepresste Spiralfeder angedrückt, der Druck lässt sich mittels einer durch den Arm D greifenden Schraube T reguliren. Durch einen Hebel K , der in einen Einschnitt des Armes D eingelegt werden kann, lässt sich die Feder abstellen. In der Figur 243, die einen ähnlichen Mechanismus an der Maschine von Gülcher darstellt, liegt der Hebel in dem Einschnitt.

Bei den auf der Tafel II dargestellten zweipoligen Maschinen von Kapp sind die Bürstenhalter und Bürsten in ganz ähnlicher Weise ausgebildet. Die Art der Isolirung ist wieder dieselbe, der Strom wird aber zu einer starken Scheibe geleitet, an welche die Kabelschuhe angeschlossen werden. Der Druck wird durch eine Spiralfeder bewirkt, die zwischen einem Ansatz am Halter und einem festen Arm sich befindet.

Ein Mangel der Methode zur Isolirung durch eine Buchse auf dem Stab des Bürstenhalters liegt darin, dass der Stab eine Drehung zulässt. Eine solidere Anordnung ist in der Figur 251 dargestellt. Das Ende des Stabes H wird abgeflacht und an einem Ansatz des Hebels R mittels zweier konischer Bolzen A befestigt; eine isolirende Zwischenlage L und zwei konische Buchsen C aus Ebonit oder Fiber sichern die Isolation.

Eine ausgezeichnete Form des Bürstenhalters, mittels deren die Bürsten in der Längsrichtung durch Bewegung einer Schraube verschoben werden können, ist von Goolden & Co. angegeben worden; zum Abstellen dient ein Hebedaumen.

Manche Erfinder haben eine Vereinfachung der Bauart angestrebt, u. A. hat Parsons zur Erzielung des Druckes Gewichte anstatt der Federn in Vorschlag gebracht.

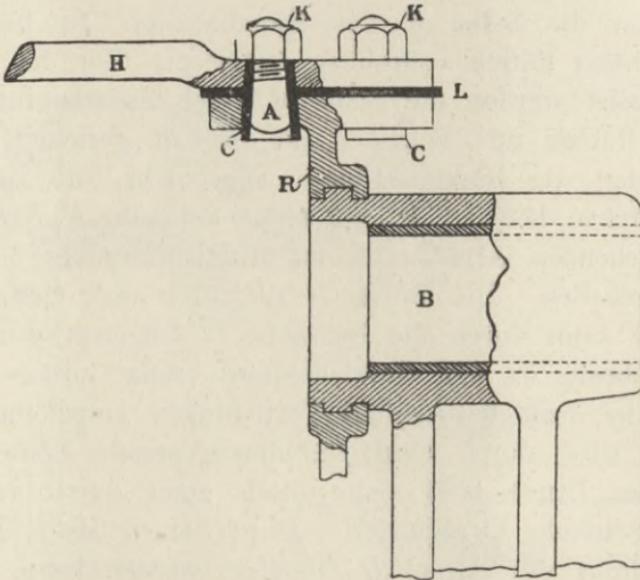


Fig. 251. Isolirter Stab des Bürstenhalters von Barley und Stevenson.

Von Siemens und Halske ist eine sehr einfache und wirksame Anordnung des Bürstenhalters eingeführt worden, die in Deutschland vielfach Verwendung findet.

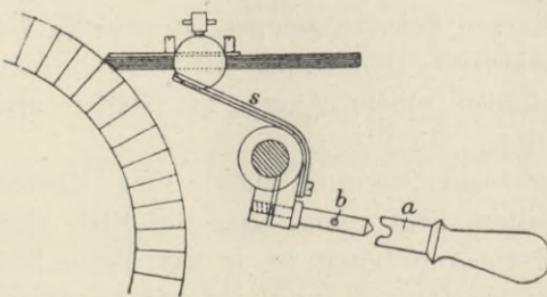


Fig. 252. Bürstenhalter von Siemens und Halske.

Bei dieser in der Tafel I und Figur 252 dargestellten Form befindet sich die Klemmvorrichtung für die Bürste am Ende einer gekrümmten Feder *s*, die aus mehreren federnden Messingstreifen besteht. Diese Feder wird an dem Halterstab durch eine Schraube *b* in ihrer Lage gehalten. Die Schraube gestattet die Verschiebung des Halters auf dem Stabe und durch Drehung die Erreichung stärkeren oder schwächeren Druckes. Der Schlüssel *a* wird zur Bewegung der Schraube benutzt. Diese Anordnung findet sich auch an den auf Tafel VIII dargestellten grossen vielpoligen Maschinen vor.

Bürsten und Stromabnehmer für Wechselstrommaschinen.

Wechselstrommaschinen besitzen keinen solchen Stromabgeber wie Gleichstrommaschinen; es sind in der Regel nur ein Paar gleitende Contactstücke nothwendig, um die Ströme zu und von dem umlaufenden Theile zu leiten. Die gewöhnliche Anordnung besteht aus einem Paar Contactringen aus Kupfer oder Rothguss, die mit isolirten Ringen auf der Welle angebracht sind, und aus einer oder mehreren Bürsten, die gegen jeden Contactring anliegen. Ist der Anker der umlaufende Theil, so müssen die Contactringe gut voneinander und von der Welle isolirt werden. Ein starker vorragender Ansatz aus Ebonit sollte zwischen den beiden Ringen angebracht werden, falls beide Ringe auf derselben Seite der Maschine sich befinden, wie es z. B. bei der Maschine von Westinghouse, Fig. 377, oder bei der von Hopkinson, Fig. 411, der Fall ist. Bei einigen Maschinen liegen die Contactringe zu beiden Seiten des Ankers, so dass nicht nur leicht eine hohe Isolation erreicht, sondern auch die Gefahr eines zufälligen Durchschlagens vermindert wird.

Gegen jeden Ring liegen häufig zwei Bürsten an, um eine Auswechselung während des Betriebes möglich zu machen.

Ist der Feldmagnet der umlaufende Theil, so müssen Contactringe und Bürsten in den Stromkreis des erregenden Stromes gelegt werden. Da aber dieser Strom schwach ist und geringe Spannung besitzt, so sind die Theile einfach und erfordern keine besondere Sorgfalt in betreff der Isolirung. Bei den von Brown erbauten Maschinen mit geringer Umlaufzahl für dreiphasigen Strom (Fig. 421) wird der erregende Strom durch zwei Riemen aus biegsamem Draht eingeführt, die über Scheiben aus Rothguss laufen.

Kapitel XV.

Mechanische Einzelheiten für den Entwurf und den Bau.

Im Kapitel XIII wurden die mechanischen Mittel zur Uebertragung der Arbeit von der Welle auf die Ankerleiter und umgekehrt betrachtet. Der Entwurf von Wellen für Dynamomaschinen, von Zapfen, Lagern, Fussgestellen und Riemenscheiben erfordert sowohl Kenntniss der mechanischen Gesetze als auch praktische Erfahrung. Im Allgemeinen muss bezüglich der Abmessungen aller dieser Theile auf die einschlägigen Werke über Maschinenbau verwiesen werden. Befinden sich aber diese Theile an elektrischen Maschinen, so erfahren sie noch durch die elektrischen und magnetischen Eigenschaften derselben besondere Beanspruchungen, welche bei der Bestimmung der Abmessungen berücksichtigt werden müssen; aus diesem Grunde erscheint die im vorliegenden Kapitel enthaltene Belehrung zweckentsprechend.

Druck auf die Lager. Bei Dynamomaschinen ist ausser dem gewöhnlichen Druck auf die Lager, der durch das Gewicht der Welle und der mit ihr verbundenen Theile ausgeübt wird, sowie ausser dem durch den seitlichen Zug des Treibriemens bewirkten Druck noch eine dritte Druck erzeugende Ursache vorhanden, nämlich der magnetische Zug, den die Feldmagnete auf den Ankerkern ausüben. In Dynamomaschinen mit einem einzelnen magnetischen Kreise ist dieser Zug erheblich. Ein Fall, in dem der Feldmagnet den Anker zu heben sucht, wird durch jene Maschinen geboten, in denen, wie bei der Maschine von Edison-Hopkinson, Fig. 287, der Magnet sich oberhalb des Ankers befindet; der entgegengesetzte Fall tritt bei den Maschinen ein, in denen sich der Anker oberhalb des Feldmagnetes befindet, wie z. B. bei der auf Tafel I und Figur 259 dargestellten Maschine von Kapp. Wenn der Anker vollkommen

centrirt ist, so besteht immer ein Bestreben, einen solchen Zug auf ihn auszuüben, dass der gesammte magnetische Kreis mehr geschlossen wird. Es lässt sich dieses theilweise dadurch vermeiden, dass man den Anker excentrisch einsetzt, und zwar bei den Maschinen mit unterem Anker etwas unterhalb des Mittelpunktes der Ausbohrung der Polflächen, etwas oberhalb dieses Mittelpunktes bei Maschinen mit oberhalb liegendem Anker. Bei der Maschine von Kapp wird der abwärts gerichtete Zug theilweise dadurch ausgeglichen, dass man die Polkanten unter dem Anker weiter auseinander stehen lässt als oberhalb des Ankers, oder dadurch, dass man Polansätze aus Gusseisen unterhalb und solche aus Schmiedeeisen oberhalb anbringt. Die Wirkung des magnetischen Zuges kann den vier- oder fünffachen Betrag des Gewichts des Ankers erreichen.

Gyrostatische Thätigkeit des Ankers. Ein anderer Punkt, der nur bei Maschinen auf Schiffen oder bei Triebmaschinen, die auf Geleisen in Curven laufen, vorkommt, betrifft die gyrostatische Thätigkeit des Ankers, der seine Achse stets in derselben Richtung zu halten sucht. Lord Kelvin hat zuerst seine Aufmerksamkeit diesem Umstande zugewendet¹⁾ und die folgende Formel für die auf das Lager ausgeübte gyrostatische Kraft angegeben.

$$F = \frac{G R^2 \Omega \omega}{g l},$$

worin F die Kraft in Kilogrammen, G das Gewicht des Ankers in Kilogrammen, l die Länge zwischen den Lagern in Metern, g die Beschleunigung der Schwere in Metern für die Secunde, ω die Winkelgeschwindigkeit des Ankers in Radianen für die Secunde, Ω die höchste Winkelgeschwindigkeit beim Rollen des Schiffes ebenfalls in Radianen für die Secunde und R den Radius der Kreisbewegung des Ankers in Metern bedeutet.

Beispiel. Es betrage das Rollen eines Schiffes 20 Grad mit einer Periode von 16 Secunden; eine Wechselstrommaschine von Siemens, Fig. 409, habe eine Umlaufzahl von 1300 in der Minute; G sei = 67 kg, R = 0,214 m, l = 0,427 m. Dann ist

$$\Omega = 2\pi \cdot \frac{20}{360} \cdot \frac{2\pi}{16} = 0,137 \text{ und}$$

$$\omega = 2\pi \cdot \frac{1300}{60} = 136.$$

1) Vergl. Jamieson, Electric Lightning for Steamships, Proc. Inst. Civil Engineers, Bd. 39, November 1834.

Demnach berechnet sich F zu 13,6 kg für jedes Lager abwechselnd bei jedem Rollen auf- und abwärts wirkend, falls die Achse der Maschine querschiffs liegt.

Hieraus wird es einleuchten, dass es unzweckmässig wäre, auf Schiffen Maschinen mit Ankern zu verwenden, die Schwungrädern ähnlich sind, wenn der Druck aus dem Ankergewicht nicht verhältnissmässig viel grösser wäre. Trommelanker, deren Länge grösser als ihr Durchmesser ist, sind zur Beleuchtung auf Schiffen vorzuziehen.

Zapfen. Aus dem Vorstehenden dürfte klar zu ersehen sein, dass die im allgemeinen Maschinenbau aufgestellten Regeln nicht ohne Weiteres beim Entwerfen von Dynamomaschinen angewendet werden dürfen. Gewöhnlich wird angenommen, dass die Wellzapfen für grössere Geschwindigkeiten grösser zu machen sind, und zwar, um die bei der höheren Geschwindigkeit erzeugte Wärme mit Hilfe der grösseren Abkühlungsoberfläche zu entfernen. Diese Annahme hat zur Aufstellung der Regel geführt

$$l = 5,6 \frac{F n}{\beta},$$

worin l die Länge in Centimetern, F die auf das Lager ausgeübte Kraft in Kilogrammen, n die Umlaufszahl in der Minute und β eine Constante bedeutet, die nach verschiedenen Angaben zwischen $66 \cdot 10^3$ und 10^6 schwankt. Bei so grossen Unterschieden der Constanten ist die Formel aber fast nutzlos, ausserdem nimmt sie keine Rücksicht auf den Zapfendurchmesser. Jede brauchbare Regel muss bei der Bestimmung des Verhältnisses zwischen Durchmesser und Zapfenlänge auch auf die Geschwindigkeit Rücksicht nehmen. Für niedrige Geschwindigkeiten, etwa bei 100 Umläufen in der Minute, braucht die Zapfenlänge die Abmessung des Durchmessers nicht zu übersteigen, während für Geschwindigkeiten von 1000 und mehr Umläufen in der Minute die Länge gleich dem fünf- bis sechsfachen Durchmesser sein muss; bei Gebläsen mit sehr hohen Geschwindigkeiten wählt man zuweilen die Länge gleich dem achtfachen Durchmesser.

Eine brauchbare Näherungsformel ist folgende:

$$\frac{l}{d} = 1 + 0,004 n.$$

Diese für gewöhnliche Wellen bestimmte Formel lässt sich jedoch nicht auf Kurbelwellen anwenden, bei denen die Centrifugalkraft von geringer Bedeutung ist, aber starke abwechselnd gerichtete Stösse und Rucke vorkommen. Noch weniger gut lässt sie sich bei Dynamomaschinen anwenden. Bei den meisten derselben wird die Kraft

auf eine geringe Länge der Welle von einer Riemenscheibe des Ankers übertragen. Der zwischen diesen beiden Theilen liegende Zapfenthail ist, wenn die Riemenscheibe nach Aussen liegt, offenbar viel stärkeren Stößen ausgesetzt, als der Zapfen am anderen Ende des Ankers. Deshalb ist der erstere Theil des Zapfens in vielen Dynamomaschinen stärker und länger als der Zapfen am Stromabgeber.

Die folgenden Angaben sind ausgeführten Maschinen entnommen:

Maschine und Ankerart	Umdrehungen in der Minute	Abstand der Lagermittlen in cm	Leistung in Kilowatt	Länge l in cm	Durchmesser d in cm	$\frac{l}{d}$
Edison, zweipolige Haupttype . . .	{ 2100 1600	45,8 88,3	1 10	6,7 17,1	1,6 3,8	4,2 4,5
Langsam laufende Maschine, viel- poliger Ring	{ — —	— —	100 1000	40 91,4	10,4 38	3,8 2,4
Manchester-Maschine, Ring (1887) .	1600	66	4,5	9,5	3,56	2,68
Wechselstrommaschine von Ferranti Sternscheibenanker (1883) . . .	{ 1700	71,1	7,5	{ 22,9 13,3	3,8 3,2	6 4,25
Kapp	780	86,4	22,5	{ 25,4 21,6	5,7 5,7	4,4 3,77
Brown	200	111,8	100	35,56	8,89	4
Union, Bahngenerator	650	130	100	30	10	3
Ferranti, Wechselstrom (1889) . . .	120	215,9	1000	144,8	35,56	4,1
Mordey, Wechselstrom, drehende Feld- magnete	{ 500	136,5	75	{ 33 33	11,4 10,2	2,88 3,25
Mordey (1894)	150	254	800	114,3	29,2	3,9
Parson-Turbo, Wechselstrom . . .	3000	—	350	30,5	5,8	5,2

Der Durchmesser eines Wellzapfens von genügender Stärke hängt ebensowohl von der auf ihn einwirkenden Biegungsbelastung als von dem verdrehenden Moment, das sich aus der übertragenen Kraft ergibt, ab. Gewöhnlich wird der Durchmesser einer Welle aus folgender Formel berechnet, die zulässig ist, falls eine Biegung nicht erfolgt:

$$d \text{ (in cm)} = c \sqrt[3]{P/n},$$

worin $c = 7,4$ für stählerne Wellen ist, n die Zahl der Umläufe in der Minute, P die Anzahl der Pferdekkräfte bedeutet.

Die seitliche Belastung einer Riemenscheibe, die vom Riemen herrührt, bringt eine beträchtliche biegende Kraft hervor. Bei dem Verhältniss der Scheibenbreite zum Durchmesser, wie es bei Dynamomaschinen gebräuchlich ist, kann der Werth von c zwischen 10,7 und 14 angenommen werden.

Die Welle der Maschine erfährt auch durch das Gewicht des Ankers eine Biegung, sowie durch den auf den Ankerkern ausgeübten magnetischen Zug und bei Riemenübertragung durch den seitlichen Zug auf die Riemenscheibe. Falls die Massen nicht genau abgeglichen worden sind, treten beim Betriebe weitere Biegungsspannungen auf. Wenn die Lager die Zapfen genau in der Richtung halten, so suchen alle genannten Wirkungen offenbar in bestimmten Punkten eine Biegung der Welle herbeizuführen. Bei Maschinen mit scheibenförmigem Anker unterliegt eine grössere Länge der Welle der Biegung, als bei Maschinen mit Trommel- und cylindrischen Ringankern, in denen der mittlere Theil versteift ist.

Für scheibenförmige Anker gilt nach Perry

$$\frac{l}{d} = 0,63 \frac{n\sqrt{L}}{1000},$$

für Trommel- und scheibenförmige Ringanker

$$\frac{l}{d} = 0,63 \frac{n\sqrt{L}}{3500} + 2,$$

wenn L die Länge der Welle zwischen den mittleren Theilen der Lager, l die Zapfenlänge, d den Durchmesser des Zapfens (alles in Centimetern) und n die Zahl der Umläufe in der Minute bezeichnet. Die Zapfen werden gewöhnlich von Ringen oder Ansätzen begrenzt, die gegen die Lager drücken und die Hin- und Herbewegung beschränken. Bei einigen Maschinenformen ist eine Hin- und Herbewegung der Welle besonders vorgesehen, um einen gleichmässigen Verschleiss des Stromabgebers zu bewirken.

Das passendste Material für Wellen von Dynamomaschinen ist Stahl, in der Regel wird Bessemer-Stahl benutzt.

Bei einigen englischen Maschinen, besonders bei kleinen und solchen von amerikanischer Bauart, wird eine Welle von überall gleichem Durchmesser benutzt, die mit eingeschnittenen Halslagern zur Vermeidung der Hin- und Herbewegung versehen ist. Dies kann nicht als eine gute Bauart bezeichnet werden. Eine Welle muss für ihre Leistung durchaus wie irgend ein anderer Theil der Maschine hergestellt werden. Es ist daher allgemein üblich, dass, wenn eine Achse eine Belastung ertragen soll, die zwischen den beiden Unterstützungspunkten eine Biegung herbeizuführen bestrebt ist, sie dort am stärksten zu gestalten ist, wo das Biegemoment am grössten ist.

Als Grundlage der Berechnung wählt man den an den Zapfen geeigneten Durchmesser (wie er aus der oben gegebenen Regel sich ergibt) und berechnet unter der Annahme, dass die Welle kreisförmigen Querschnitt besitzen soll, die Durchmesser für die anderen Theile nach der Regel, dass der Durchmesser in jedem Punkte proportional der Kubikwurzel des Biegemomentes in dem betreffenden Punkte ist. Es darf nicht übersehen werden, dass, wenn Nuthen nachher zur Festlegung des Ankersternes oder anderer festzulegender Theile eingeschnitten werden sollen, der Durchmesser um den zu vermindern den Betrag vergrößert werden muss, so dass demnach keine Schmälerung der Festigkeit eintritt. Die Welle der Maschine von Brown liefert ein Beispiel ausgezeichneter Bauart (Tafel IV), ebenso die Welle in der Maschine von Kapp (Tafel II) und von Mordey (Fig. 283).

Bei der zuerst genannten Maschine sieht man, wie der Ankerstern auf den mittleren Theil der Welle aufgepasst ist und das Ganze durch eine aufgeschraubte Mutter und ein Halslager auf der Welle gehalten wird. Der Stromabgeber sitzt auf einer anderen kürzeren Buchse, die über einen etwas abgedrehten Theil der Welle geschoben ist. Die Riemenscheibe ist zwischen den Lagern angebracht. Bei der Maschine von Kapp sitzt der Ankerstern an einer langen Buchse aus Gusseisen, die den mittleren Theil der Welle versteift, und wird von einer gegen ein Halslager sich stützenden Schraubenmutter gehalten.

Lager und Gestelle. Die Lager für Dynamomaschinen sind stets so zusammengesetzt, dass der Anker abgehoben werden kann, und bestehen gewöhnlich aus Messing- oder Rothgussstücken, die an einem geeigneten Gestell sitzen. Man vergleiche in dieser Hinsicht die Zeichnungen der Gestelle und Lager verschiedener Maschinen, besonders der Maschinen von Kapp auf Tafel II; ferner der auf Tafel I und III und in den Figuren 273 und 277 dargestellten Maschinen. Werden lange Lager verwendet, so stellt man sie auch wohl aus Gusseisen anstatt aus Rothguss oder Messing her. Häufiger wird ein weiches Metall verwendet, z. B. ein unter dem Namen Babbit's Metall bekanntes; derartiges Antifrictionsmetall wird in schwache Vertiefungen eingegossen, die zu diesem Zwecke in dem Hohlraum der Lagerpfanne hergestellt worden sind. Eine Mischung unter dem Namen Magnolia wird in der Neuzeit ebenfalls häufig zu diesem Zwecke angewendet.

Kugellager. Mit der Einführung von Präzisionsmaschinen zur Herstellung von Stahlkugeln für Antifrictionslager sind die

Letzteren in Aufnahme gekommen. Figur 254 giebt die Ansicht eines solchen Lagers und zeigt die Anordnung der Kugeln zwischen den inneren sich drehenden und den äusseren feststehenden Ringen.

Kammzapfenlager. Bei allen Dynamomaschinen mit Scheiben- oder ähnlichen Ankern darf kein Hin- und Herspielen der Welle stattfinden, es müssen daher Kammzapfenlager angebracht werden, ähnlich denen, die bei der Welle einer Schiffsschraube aus vorstehenden Halsringen hergestellt werden. Anstatt dessen kann man auch die Welle an den Lagern mit Einschnitten herstellen, so dass Vorsprünge gegen die Lager stossen. Man vergleiche die Zeichnungen der folgenden Maschinen:

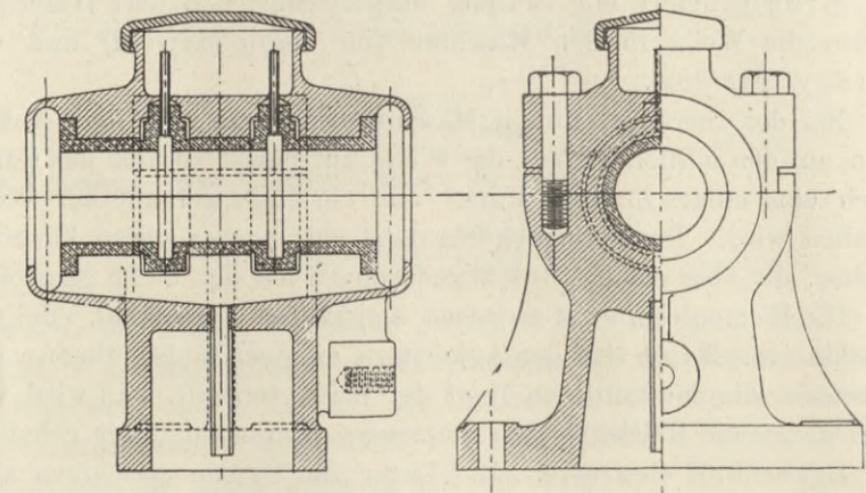


Fig. 253. Kammzapfenlager des Ankers von Kapp. Maassstab 1:6.

Viktoria-Maschine von Mordey (Fig. 283);

Wechselstrommaschine von Ferranti, Fig. 417, auch die von Kapp in Figur 253.

Kugelschalen-Lager. Bei allen langen Lagern ist es von grosser Bedeutung, dass sie nicht nur genau concentrisch sind, sondern dass ihre Achse auch genau mit der der Welle übereinstimmt. Um dies zu erreichen, wird häufig das Lager mit einem kugelförmig gestalteten Futter versehen, d. h. diese Gestalt oder nahezu eine solche giebt man dem mittleren verbreiterten Theil des Lagers und bringt für denselben dann noch eine Unterlage von weichem Metall auf dem Gestell an¹⁾.

1) Vergl. Abhandlung von Coleman Sellers, in dem Journ. of Franklin Institute für 1872, oder auch Engineering, Bd. 15, S. 17.

Die Figur 255 zeigt die von Ravenshaw bei den Maschinen von Goolden & Co. angewendete Anordnung.

Die Lager der Wechselstrommaschine von Weston sind denen in Figur 255 ähnlich, aber für längere Zapfen eingerichtet.

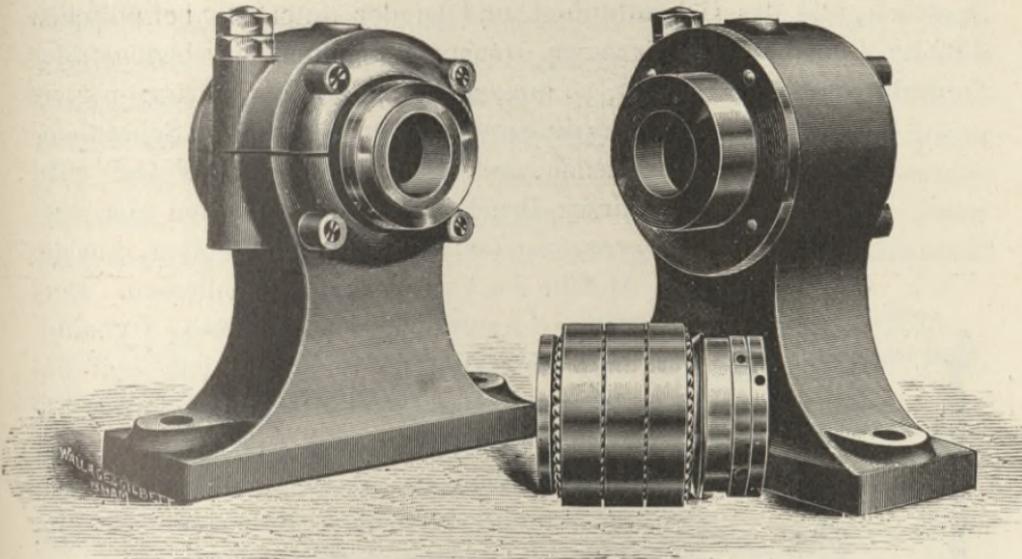


Fig. 254. Kugellager der Auto-Machinery Company.

Schmiergefäße. Die Lager müssen eine hinreichende Zufuhr von Schmieröl oder Fett erhalten, es sind aber auch Anordnungen zu treffen, die einem unnützen Verbräuche vorbeugen. In der Regel bringt man in dem hohlen Gusstheil des Fussgestelles eine Aussparung an, welche das von den Enden der Lager abtropfende Oel aufnimmt. Tropfgefäße für Schmierung, die das Oel tropfenweise zuführen, sind für gewöhnliche Maschinen unzweifelhaft am besten. Ein solches Schmiergefäß ist in der Figur 256 dargestellt. Mit dem Hebel *C* an der Spitze des Gefäßes schliesst man das Oel ab, sobald die Maschine nicht mehr im Betriebe ist. Mittels der Ringe *A* und *B* lässt sich der Oelabfluss durch die Röhre regeln. Bei Schiffsmaschinen sind besondere Formen, die ein Verschütten des Oels

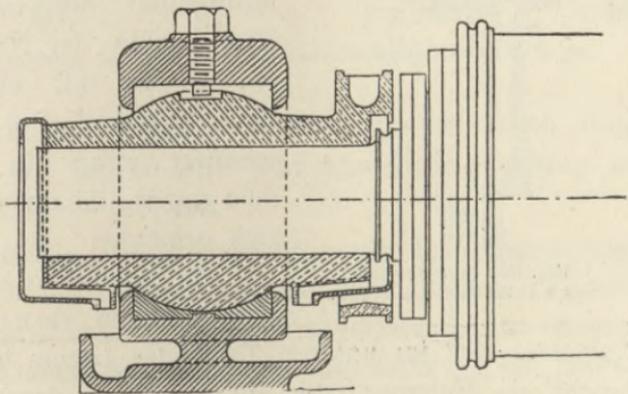


Fig. 255. Kugelschalen-Lager der Maschine von Goolden.

Bei Schiffsmaschinen sind besondere Formen, die ein Verschütten des Oels

nicht zulassen, vorzuziehen. An den Wellen bringt man in der Regel noch einen Auffangring an, der das Oel in seiner Höhlung aufnimmt und centrifugal abwirft, das Lager greift dann lippenförmig etwas über (siehe Fig. 255) und ist mit einer Abflussvorrichtung versehen, die das Oel aufnimmt und zu der unterhalb befindlichen Pfanne führt. Da bei grossen Dynamomaschinen ein bedeutendes Gewicht die Lager belastet, so müssen besondere Vorkehrungen, wie

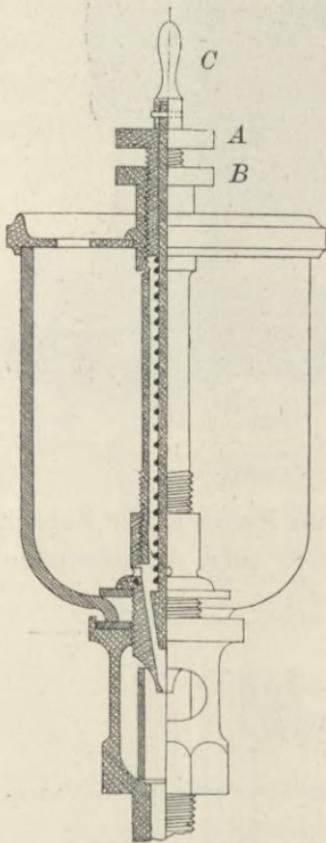


Fig. 256. Tropfgefäss mit sichtbarer Schmierung.

für die Schmierung der Lager von Schraubewellen, getroffen werden. Das Oel wird unter Druck zugeführt, zuweilen aus zwei voneinander unabhängigen Quellen, um die Gefahr des Versagens auszuschliessen. Derartige Anordnungen sind bei Dynamomaschinen um so nothwendiger, weil die Bewegung eine reine Drehung ist und die Welle nicht, wie die Kurbelwelle einer Dampfmaschine, abwechselnd seitlichen Stössen ausgesetzt wird, die zur Verbreitung des Oeles an den Zapfen beitragen.

Sellers¹⁾ hat eine doppelte Schmierung zur Sicherheit vorgeschlagen. Der gewöhnliche Schmierapparat giebt Oel an den Mittelpunkt des Lagers ab; am oberen Theil ist in der Nähe eines jeden Endes ein Gefäss mit einer steifen Mischung aus Talg und Oel angebracht, die nur schmilzt, wenn die Lager aus Mangel an dem gewöhnlich zugeführten Schmiermaterial sich erhitzen.

Zuweilen werden selbstthätige Schmier-
vorrichtungen verwendet, bei welchen ein Oelgefäss sich im unteren Theil des Lagers befindet; in das Gefäss taucht ein Halsring oder ein lose über den Zapfen laufender Ring ein oder nur ein Ring aus Filz. Figur 257 stellt eine solche Schmiervorrichtung dar, welche die Allgemeine Electricitätsgesellschaft in Berlin bei ihren Motoren anwendet. Einzelne Fabrikanten versehen das Weichmetallfutter des Lagers mit spiralig laufenden Vertiefungen, durch welche das von dem Ringe zugeführte Oel

1) Unwins Machine Design, S. 171.

dem Zapfen gleichmässig zugeführt werden soll. Für Maschinen und Motoren der »Schirm«gattung (vergleiche Tafel VI) mit vertikalen Wellen für Turbinenantrieb sind ganz eigenartige Schmier-
vorrichtungen erforderlich. Bei grossen Maschinen dieser Art werden
Einrichtungen getroffen, durch welche die Lager von einem grossen
Theile des todtten Gewichtes entlastet werden, gewöhnlich durch
hydraulischen Druck, in einzelnen Fällen auch durch elektro-
magnetischen Zug. Bei den grossen Niagara-Wechselstrommaschinen
(Fig. 432) befindet sich das Schmieröl in grossen gusseisernen
Behältern von etwa 1 m Durchmesser, welche an der Welle unter-
halb der Lager angebracht sind. In das Oel taucht eine feststehende

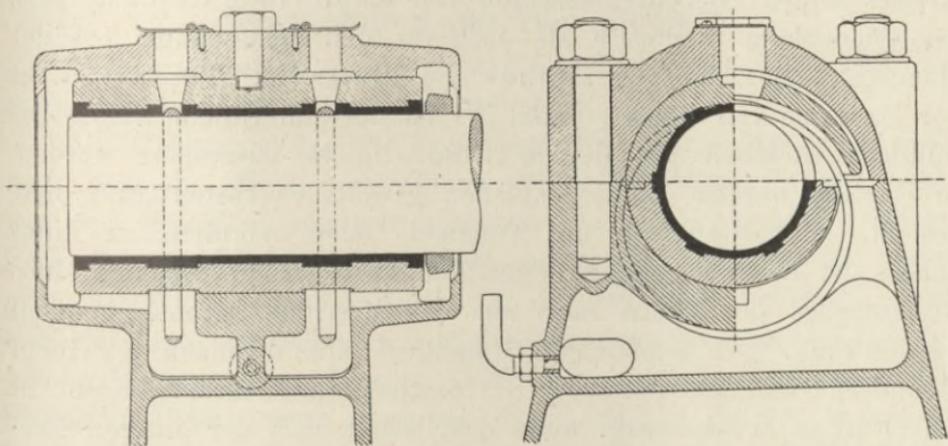


Fig. 257. Lager mit Ringschmierung der Allgemeinen Electricitätsgesellschaft in Berlin.

Röhre; bei der Drehung des Oelbehälters steigt das Oel durch diese
Röhre bis zur Spitze des Lagers auf. Für künstliche Kühlung ist
noch durch Wassercirkulation gesorgt.

Keile und Federn. Die zur Befestigung des Ankers und
der Riemenscheibe auf der Welle benutzten Keile sollten versenkt
oder flach sein, die Sattelform ist weniger zuverlässig. Die Regeln
für Herstellung von Keilen sind folgende: Bedeutet b die Breite,
 t die mittlere Dicke und d den Durchmesser der Nabenöffnung in
Centimetern, so ist

$$b = \frac{1}{4}d + 0,317,$$

$$t \text{ (für versenkte Keile)} = \frac{1}{10}d + 0,317,$$

$$t \text{ (für flache Keile)} = \frac{1}{11}d + 0,159.$$

Wo zwei oder mehr Federn auf entgegengesetzten Seiten der Welle benutzt werden, kann jede etwas geringere Abmessung besitzen.

Riemenscheiben und Riemen. Hierfür bedarf es der Angabe besonderer Regeln nicht, da die gewöhnlichen Regeln des Maschinenbaues ausreichend sind.

Bodenplatten. Beim Entwurf von Bodenplatten spart man gewöhnlich an Gewicht dadurch, dass man das Metall an den Sohlflächen ausnimmt und dafür an geeigneten Stellen versteifende Theile oder Flanschen anordnet. Dies ist ganz zweckmässig, ausgenommen solche Fälle, in denen ein Theil der Bodenplatte auch zu magnetischen Zwecken dient und einen Theil des magnetischen Kreises bildet. Bei der Maschine von Kapp (Tafel II) dient z. B. die Bodenplatte theilweise als Joch für den Feldmagnet; bei der Manchester-Maschine von Mather und Platt (Fig. 285), ebenso bei der Maschine von Brown (Tafel IV) ist der unter dem Anker befindliche Gusstheil aus diesem Grunde nicht ausgespart worden. In England werden die Bodenplatten gewöhnlich kastenförmig hergestellt. Bei Maschinen mit Trommel- oder cylindrischen Ringankern ist es zweckmässig, wenn der Anker nach Abnahme eines Gestelltheiles der Länge nach aus der Maschine herausgenommen werden kann. Der abnehmbare Gestelltheil muss demnach aus einem besondern Gussstücke bestehen. Bei Maschinen mit oberhalb liegendem Anker ist es zweckmässig, wenn das Gestell nach der unteren Seite des Ankers zu niederlegbar ist, und dass, wenn der obere Theil entfernt wird, der übrige Theil einen bequemen Halt für den zu entfernenden Anker bietet. Ein Beispiel bietet die Figur 273, sowie die Maschine von Kapp (Tafel II).

Kuppelungen. Werden Dynamomaschinen von einer Dampfmaschine auf derselben Bodenplatte ohne Vorgelege angetrieben, so werden häufig die Wellen gekuppelt. Derartige Vorkehrungen werden in verschiedener Weise ausgeführt, so z. B. von Brotherhood mittels eines Verbindungstheiles aus Leder und von Raworth mittels biegsamer Stahlbänder, die einen gewissen Spielraum gestatten, falls sich die beiden Wellen nicht genau in Linie befinden. Es ist gut, die Kuppelung so zu construiren, dass sie zugleich die Dynamomaschine gegen die Dampfmaschine isolirt.

Kapitel XVI.

Elemente für den Entwurf von Dynamomaschinen.

Berechnung der Wickelungen.

Die in diesem Kapitel gebrauchten Buchstaben haben die auf Seite 158 und 159 angegebene Bedeutung.

Die Erfahrung ist, wie beim Bau einer jeden Maschine, auch beim Bau von Dynamomaschinen der schliessliche Führer. Ehe wir eine Maschine construiren können, müssen wir wissen, welche Spannung und wieviel Ampere sie geben soll. Wir müssen ebenfalls Bestimmung treffen über die Umlaufgeschwindigkeit. Soll eine Maschine entworfen werden, die bei einer bestimmten Umlaufgeschwindigkeit eine gewisse Zahl von Ampere bei gegebener Spannung liefern muss, so bietet diese Aufgabe für den Ingenieur keine Schwierigkeiten, sofern dieser im Entwurf von Maschinen derselben Form, wenn auch mit verschiedener Leistung, Erfahrung besitzt. Hat Jemand zweipolige Gleichstrommaschinen für Glühlicht schon entworfen, so ist der Entwurf einer andern Maschine derselben Art für ihn leicht. Indessen wird es auf Grund seiner Erfahrung allein für ihn nicht leicht werden, zum Entwurf vielpoliger Maschinen oder von Wechselstrommaschinen überzugehen. Glücklicherweise haben wir bereits eine grosse Zahl von Angaben über gute Maschinen der verschiedensten Bauart und Grösse. Solche in Tabellen niedergelegte Angaben der Ergebnisse der Erfahrung sind für den Constructeur von unschätzbarem Werthe. An erster Stelle sind hier zu nennen die Angaben, die Wiener in einer Reihe von Aufsätzen in der *Electrical World* 1894 und 1895 veröffentlicht hat. Bei manchen Punkten braucht man solche Angaben nicht, sondern kann das Erforderliche aus den Grundprincipien herleiten.

Es ist z. B. bekannt, dass die Leistung einer Maschine gegebener Form in Watt bei einer gegebenen Geschwindigkeit annähernd dem

Gewicht proportional ist. Es sei etwa eine Maschine von 720 Umläufen in der Minute für 200 Ampere bei 105 Volt gegeben. Benutzt man dasselbe Eisengestell und versieht die Maschine mit neuen Wickelungen, die gleiches Gewicht wie die früheren besitzen, so kann die Maschine bei derselben Umlaufgeschwindigkeit 300 Ampere bei 70 Volt oder 250 Ampere bei 84 Volt oder 30 Ampere bei 700 Volt liefern, das Product beträgt in jedem dieser Fälle 21 000 Watt. Eine Maschine für die doppelte Leistung würde, falls sie von derselben Art ist, annähernd das doppelte Eisengewicht und das doppelte Kupfergewicht besitzen.

Da auch die Spannung proportional der Geschwindigkeit ist, so würde eine andere Maschine mit derselben Leistung, aber bei einer Umdrehungsgeschwindigkeit von 480 anstatt 720 Umläufen in der Minute, ein etwa $1\frac{1}{2}$ mal so schweres Gestell erfordern. Ein Maschinenbauer, der Gestelle verschiedener Grösse auf Lager hat, wird demnach die passende Grösse auswählen und geeignete Wickelungen verwenden.

Damit man zunächst zum Verständniss gelangt, muss man den Entwurf einiger gut gebauter Maschinen sorgfältig untersuchen, um zu ersehen, in welcher Weise die Abmessungen verschiedener Theile ihrer Bestimmung angepasst worden sind. Dadurch wird die Ausarbeitung einer neuen Maschinenart erleichtert. Aber damit wir wissen, welche Angaben wir der Erfahrung entnehmen müssen, wollen wir einen vorläufigen Versuch machen, einen Entwurf zu berechnen. Zur Bestimmung der passenden Grösse der Theile sind Berechnungen nothwendig. Einige derselben sind rein elektrischer, andere magnetischer, andere mechanischer Art, wieder andere sind durchaus empirischer Natur und gründen sich auf Erfahrung.

Soll z. B. eine Maschine für 200 Ampere bei 55 Volt hergestellt werden, so bestimmt sich die Stärke des Drahtes, der für die Maschine im gegebenen Falle zu wählen ist, aus der Forderung der Praxis, dass eine Ueberhitzung des Drahtes vermieden werden muss. Eine Berechnung ist aber nicht nothwendig, sondern man entnimmt die Angabe über die Drahtstärke einer Tafel. Die Kenntniss, dass man für Anker in der Regel mit Sicherheit für das Quadratcentimeter 310 und mehr Ampere zulassen kann, genügt dazu.

Wählen wir im vorliegenden Falle einen Litzendraht von 7 Drähten, so würde eine Drahtstärke Nr. 13 *SWG* genügen, da der Litzenschnitt hierbei $7 \cdot 4,3 = 30$ gmm beträgt, also ganz gut 100 Ampere zu leiten vermag (jeder Leiter führt nur die Hälfte des Ankerstromes).

Handelt es sich um eine Nebenschlussmaschine, was für Lichtanlagen mit constanter Spannung der Fall sein muss, so tritt ausser den 200 Ampere für die Lampen noch ein Zusatzbetrag für die Nebenschlusswicklung hinzu, wofür ein Betrag von 5 Ampere, oder $2\frac{1}{2}$ Procent der Stromstärke in Rechnung zu setzen ist. Es entsteht nun die Frage nach der Erzeugung der 55 Volt Spannung. Welche Grösse ist für den Anker, welche Wickelung, welche Grösse ist für den Feldmagnet zu wählen? Wie muss der letztere bei der geeigneten Geschwindigkeit bewickelt werden? Es ist ferner zu bedenken, dass, wenn 55 Volt Klemmenspannung herrschen sollen, der Anker mit Rücksicht auf den Spannungsverlust (S. 170) eine höhere Spannung, etwa 57 oder 58, zu erzeugen haben wird.

Die Grundgleichung für eine Gleichstrommaschine lautet:

$$E = \frac{n N \mathcal{S}}{10^8}.$$

Ist die Geschwindigkeit n gegeben, so besagt die Gleichung, dass die Spannung von N , der Zahl der Ankerleiter (d. h. dem Kupfergewicht) und von \mathcal{S} , der Zahl der magnetischen Linien, die den Anker durchsetzen (d. h. vom Querschnitt des Eisenkernes und von dem Grade, zu dem die Magnetisirung gesteigert wird), abhängig ist. Es sei nun eine Geschwindigkeit von 1140 Umläufen in der Minute vorgeschrieben, so dass auf die Secunde 19 Umläufe entfallen. Wird E zu 57 Volt angenommen, so folgt, dass $N\mathcal{S}$ genau $= 3 \cdot 10^8$ sein muss. Aber wie gross muss jede der beiden Grössen sein? Die Erfahrung hat gezeigt, dass in solchen Maschinen, wie die hier vorausgesetzte, jede Ankerabtheilung am besten aus einer oder höchstens aus zwei Windungen besteht, die entweder auf einem Ringe oder einer Trommel liegen. Ferner lehrt die Erfahrung, dass es für zweipolige Maschinen zweckmässig ist, wenn die Zahl der Abtheilungen (also auch die Zahl der Stäbe des Stromabgebers) ein Vielfaches von 6 bildet. Wenn nun weniger als 30 Abtheilungen vorhanden sind, so entstehen leicht Schwankungen und Funkenbildung, und wenn 150 oder mehr vorhanden sind, so bedingt dies eine bedeutende Vertheuerung beim Bau. Wir können 42, 48, 54, 60 oder 72 wählen und danach den Plan ausarbeiten.

Befindet sich nur eine Wickelung in jeder Abtheilung des Ringankers, so ist N gleich der Zahl der Stäbe im Stromabgeber; wird eine Trommelwicklung gewählt, so ist N zweimal so gross. Wenn N klein ist, muss \mathcal{S} gross sein und umgekehrt; um Funkenbildung zu vermeiden, ist es zweckmässig, \mathcal{S} gross und N klein zu wählen.

Wir wählen N zu 72, so dass auf der Trommel sich 36 Abtheilungen und ebenso viele Stäbe am Stromabgeber befinden. Demnach muss

$$\mathcal{S} = \frac{3 \cdot 10^8}{72} \text{ oder } = 4166600 \text{ sein, d. h. es muss die Kraftlinien-}$$

menge im Ankerkern rund 4170000 magnetische Linien betragen. Der richtige Grad der Magnetisirung in den Ankern solcher Maschinen beträgt 12000 bis 17000 Linien für das Quadratcentimeter. Um 4170000 Linien durch den Ankerkern zu leiten, braucht man einen Querschnitt von etwa 288 qcm. Wie wird dieser Querschnitt zu bestimmen sein? Wie gross sind die Kernscheiben zu wählen, und in welcher Länge werden die Scheiben zusammen zu packen sein? Nehmen wir grosse Kernscheiben von grosser radialer Tiefe, so werden wir nur eine verhältnissmässig geringe Zahl gebrauchen, und der Anker wird kurz ausfallen, nehmen wir kleinere Kernscheiben, so wird der Anker lang werden. Zwei Rücksichten beeinflussen hier die Entscheidung.

Als Leiter für den Strom ist vorläufig Litzendraht von 30 qmm Querschnitt festgesetzt worden, von dem 13,3 Windungen nebeneinander auf je 10 cm Länge aufgebracht werden können. Sollen demnach 72 Leiter in einer Lage aufgebracht werden, so nehmen sie etwa 54 cm Raum nebeneinander ein. Giebt man für einzusetzende Triebstücke zu, so erhalten wir für die Scheiben etwa 18 cm äusseren Durchmesser. Wählen wir den Durchmesser zu 18,4 cm mit einer Ausbohrung von 10,8 Weite, so beträgt die doppelte radiale Tiefe des Eisens 7,6 cm. Da wir nun 288 qcm Schnittfläche des Eisens haben müssen, wozu eine Länge von etwa 38 cm, oder, wenn die Isolationsschicht zwischen den Scheiben mit berechnet wird, eine Länge von 40,5 cm gehört, so wird der Kern der Trommel etwa die doppelte Abmessung als der Durchmesser erhalten. Gewöhnlich wählt man die Länge der Trommelkerne etwas grösser als den Durchmesser, indessen genügt unsere Berechnung dem beabsichtigten Zweck.

Es kommt aber noch etwas in Betracht.

Wenn wir 36 vollständige Windungen des Leiters erhalten haben, und jeder Leiter 102,5 Ampere Strom führt, so ergiebt dies für die gesammte quermagnetisirende Wirkung das Product von 3690 Ampere-Windungen. Wird dies Ergebniss für den Kern von 18,4 cm Durchmesser zu gross sein, d. h. eine Funkenbildung herbeiführen? Diese Frage lässt sich nur auf Grund der Erfahrung entscheiden. In einer zweipoligen Maschine mit Trommelwicklung kann eine Kernscheibe von 18,4 cm Durchmesser mindestens

5200 Ampere-Windungen ertragen, ohne dass Funkenbildung eintritt, so dass wir unterhalb der Grenze, bei der Funkenbildung eintritt, bleiben.

Wir könnten die inneren Widerstände durch Wahl einer kleineren Kernscheibe etwas verringern, wenn wir einen längeren Kern herstellen, der weniger Draht durch Uebergreifen über die Enden der Trommel verbraucht, in diesem Falle wäre aber der zuerst gewählte Litzendraht nicht zu verwenden. Wählen wir z. B. 15 cm Kernscheiben mit etwa 5 cm grossen Bohrungen, so erhalten wir eine Länge von 30,5 cm oder eine Gesamtlänge von fast 33 cm. Es lassen sich aber die 72 Leiter nicht um die Peripherie legen, wenn sie nicht besonders dazu eingerichtet sind, z. B. als gezogene Kupferstreifen, von denen je drei nebeneinander liegen (Fig. 258 a), und von denen jeder 6,35 mm hoch und 1,52 mm stark ist. Die drei zusammen überspannenen Streifen wären etwa 5,33 mm



Fig. 258 a.

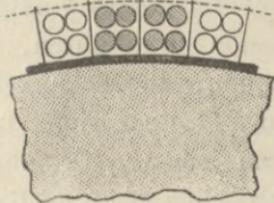


Fig. 258 b.

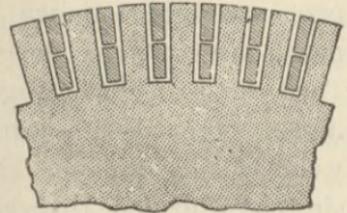


Fig. 258 c.

stark; die 72 Leiter würden demnach etwa 38 cm Raum um die Peripherie erfordern und liessen 9,6 cm zur Einsetzung von Triebstücken übrig.

Eine andere Wickelung könnte man mit 19 cm grossen Kernscheiben und vier Leitern nebeneinander, anstatt der Litzendrähte, anfertigen. Jeder Leiter würde dann aus Draht von der Sorte 10 BWG (0,128" = 3,25 mm stark) bestehen und 25 Ampere leiten; die Drähte wären zu zwei übereinander anzuordnen, wie in Figur 258 b, und man erhielte 144 um die Peripherie herum, die nebeneinander etwa 55,9 cm Raum einnehmen. Eine dritte Art würde sich ergeben, wenn wir gezahnte Kernscheiben von 20,8 cm Durchmesser mit 72 Zähnen wählten, ferner Drähte von rechteckigem Querschnitt, zu zweien übereinander zwischen die Zähne versenkt, wie in Figur 258 c; der Drahtquerschnitt wäre dann 3,2 mm dick und 5,1 mm hoch zu nehmen.

Wären genau passende Kernscheiben nicht auf Lager, sondern solche von 17,8 cm Abmessung, so würde man natürlich diese nehmen und dementsprechend den Draht wählen. Der schliessliche Unterschied im Wirkungsgrade der Maschine würde unbedeutend sein.

Verbleiben wir indessen bei den früher gewählten Maassen von 18,4 cm für den Durchmesser der Kernscheiben und 40,5 cm für die Ankerlänge und nehmen an, dass die Kupferwicklung und die Bindedrähte den äusseren Durchmesser bis auf 20,6 cm vergrössern.

Für den Feldmagnet wählen wir die Form Nr. 31 der Figur 102 und stellen die horizontalen Schenkel aus Gusseisen her. Vorläufig müssen wir nun einen Zerstreungscoefficienten annehmen, wir schätzen denselben auf etwa 2. Demnach muss der Feldmagnet so gebaut werden, dass er 8340 000 Linien anstatt 4170 000 leitet. Da nun die Erfahrung zeigt, dass es nicht zweckmässig ist, die Magnetisirung über 7000 Linien für das Quadratcentimeter zu steigern, so setzt dies einen Querschnitt von etwa mindestens 1191 qcm voraus. Es ist ferner zweckmässig, wenn der Ankerkern etwas zu beiden Seiten des Feldmagnetes vorsteht. Dies lässt sich durch Abschrägung der Poltheile herbeiführen, während der übrige Theil breit bleibt. Angenommen, die Schenkel des Feldmagnetes hätten einen Querschnitt von 41,9 cm Tiefe und 29,2 cm Breite, welche Länge müssten sie dann haben? Offenbar eine solche, dass sie Raum für den Ankerkern zwischen sich und Raum für eine Wicklung lassen, die eine genügende Zahl von Windungen besitzt, um die Magnetisirung bis zu der nothwendigen Höhe zu bewirken. Der nothwendige Bedarf an Draht ist zunächst aus der Zahl der Ampere-Windungen nach dem Gesetz des magnetischen Kreises zu berechnen. Es fragt sich nur, wie man dieses Gesetz anwenden kann, ohne die Länge des Eisens zu kennen. Die zu diesem Zwecke angewendete Methode bildet eine Annäherung.

Man stellt eine vorläufige Berechnung an, bei der man eine rohe Schätzung der noch unbestimmten Länge der Eisenschenkel vornimmt. Ist dies geschehen, so prüft man, ob ohne mechanische Schwierigkeit oder Gefahr der Ueberhitzung die berechnete Drahtmenge auf der Länge des angenommenen Schenkels aufzubringen ist, danach verringert oder vergrössert man die gewählte Länge und wiederholt die Berechnung. Hier wird die Sache wiederum verwickelt.

Nehmen wir an, der Anker habe keine entmagnetisirende Wirkung, so werden wir die berechnete Drahtmenge weit geringer als die wirklich erforderliche finden. Deshalb berechnet man mittels der Regel auf Seite 216 annähernd die Zahl der entmagnetisirenden Ampere-Windungen und addirt die doppelte Zahl zu der Zahl

der vorhin gefundenen Ampere-Windungen; denn der Feldmagnet muss lang genug gemacht werden, um diese Zusatzwicklung aufzunehmen.

Nimmt man in dem hier betrachteten Falle die Polwinkelgrösse zu 145 Grad auf jeder Seite an, so folgt, dass $\frac{145}{180}$ von 72 oder etwa 58 Leiter des Ankers sich in jedem Augenblick in dem Luftzwischenraum befinden und dass ein Leitergürtel (Fig. 70) von je 7 Leitern sich zwischen den Spitzen der Polstücke befindet. Dies giebt 700 Ampere-Windungen für die entmagnetisirende Kraft unter der Voraussetzung, dass die Bürsten sich in der Nähe der Polspitzen befinden.

Der äussere Durchmesser des Ankers beträgt also 20,6 cm, wir müssen 1,5 mm Spielraum um den Anker belassen und demnach die ausgebohrte Polfläche 20,9 cm im Durchmesser gestalten, so dass der wirkliche Zwischenraum von Eisen zu Eisen 12,5 mm beträgt. Die Länge der Zwischenräume längs der Krümmung kann zu 27,3 cm und von vorn nach rückwärts gemessen, zu 38,1 cm angenommen werden. Nunmehr können wir die früher aufgestellten Regeln zur Berechnung des Feldmagnetes anwenden.

Elektrische Berechnungen.

1. Berechnung des Spannungsverlustes im Anker.

Man ermittelt die Zahl i_a der Ampere im Anker, multiplicirt diese mit der Zahl der Ohm, die den inneren Widerstand des Ankers darstellen.

$$\text{Spannungsverlust in Volt} = r_a i_a.$$

Diese Methode kann man zur Berechnung des Spannungsverlustes durch den Widerstand einer mit der Ankerwicklung hintereinander geschalteten Wicklung benutzen. Nennt man die anderen inneren Widerstände des Hauptkreises, z. B. den der Zusatzwicklung, r_m , so ist dieser Werth zu r_a zu addiren, demnach der

$$\text{Spannungsverlust in Volt} = (r_a + r_m) i_a.$$

2. Berechnung der Stromstärke im Nebenschluss.

Man dividirt die Klemmenspannung e durch den Widerstand r_s der Nebenschlusswicklung

$$i_s = \frac{e}{r_s}.$$

Gut gebaute neuere Maschinen vorausgesetzt, beträgt i_s etwa 20 bis 15 Procent von i bei Maschinen von weniger als 1 Kilowatt; 10 bis 5 Procent bei Maschinen von 1 bis 10 Kilowatt; 5 bis $2\frac{1}{2}$ Procent bis zu 200 Kilowatt und $1\frac{1}{2}$ Procent (oder noch weniger) bei Maschinen von 1000 Kilowatt.

3. Berechnung der Stromstärke im Anker.

Man addirt zur Stromstärke i des äusseren Kreises die Stromstärke i_s im Nebenschluss;

$$i_a = i + i_s.$$

4. Berechnung der für die Ankerwicklung nothwendigen Drahtstärke.

Da zwei Stromwege sich im Anker befinden, dividirt man i_a durch 2 und zieht dann eine Tafel für die Drahtstärken nach Maassgabe der Stromstärke zu Rathe. Festzuhalten ist, dass man bei sehr kleinen Maschinen bis auf 6,2 Ampere für das Quadratmillimeter und bei grossen Maschinen bis auf 3,1 Ampere für das Quadratmillimeter Querschnitt gehen kann.

5. Berechnung der im Anker einer Maschine erzeugten elektromotorischen Kraft.

Man bestimmt die Spannung e , die an den Klemmen der Maschine erforderlich ist, um den verlangten Strom in die Hauptleitungen zu senden, und addirt dazu den Spannungsverlust.

$$E = e + r_a i_a.$$

E ist die Zahl der Volt, die der Anker zu erzeugen hat.

6. Berechnung der Zahl N der Ankerleiter.

Diese gründet sich auf Erfahrung, vergl. Seite 293 und 320.

7. Berechnung der elektromotorischen Kraft im Anker (für eine Gleichstrommaschine).

Man multiplicirt die Umlaufszeit n in der Secunde mit der Zahl der Ankerleiter N , das Product mit dem Werth \mathfrak{S} der Magnetisirung und dividirt durch 10^8 , weil 1 Volt entsteht, wenn 10^8 magnetische Linien in der Secunde geschnitten werden, oder weil 1 Volt = 10^8 CGS-Einheiten der elektromotorischen Kraft ist.

Demnach ist

$$E \text{ (in Volt)} = \frac{n \mathfrak{S} N}{10^8}.$$

(Beispiel: Bei einer Phönix-Maschine ist $n = 23,6$; $N = 180$; $\mathfrak{S} = 2530000$. Suche E .)

Bei vielpoligen Maschinen muss man noch durch die Zahl der Stromverzweigungen dividiren. Bei Ankerwickelungen ohne innere Querverbindungen wird diese Zahl gleich der halben Bürstenzahl sein (vergl. Seite 242).

Leistungsberechnungen.

8. Berechnung der in einer Dynamomaschine verbrauchten Arbeit.

Um die elektrischen Pferdekkräfte aus den Watt zu berechnen, dividirt man die Zahl der Watt durch 736.

a) In der Ankerwicklung verbrauchte Arbeit.

Man multiplicirt den Spannungsverlust im Anker mit der Stromstärke im Anker, oder den Widerstand der Ankerwicklung mit dem Quadrat der Stromstärke.

b) In der Reihenwicklung verbrauchte Arbeit.

Man multiplicirt den Spannungsverlust in der Reihenwicklung mit der Stromstärke in der letzteren, oder den Widerstand der Wickelung mit dem Quadrat der Stromstärke.

c) Im Nebenschluss verbrauchte Arbeit.

Man multiplicirt die Stromstärke im Nebenschluss mit der Klemmenspannung desselben, oder man dividirt das Quadrat der Klemmenspannung durch den Widerstand des Nebenschlusses.

d) Die durch Wirbelströme verbrauchte Arbeit lässt sich nicht unmittelbar bestimmen.

e) Durch Hysteresis verbrauchte Arbeit.

Aus den Zahlen auf Seite 128 lässt sich der Verbrauch in Watt bei gut geblättertem weichen Eisen bestimmen, wenn dasselbe, wie in dem umlaufenden Anker einer Dynamomaschine, einer Folge magnetischer Kreisläufe ausgesetzt wird.

9. Berechnung des elektrischen Güteverhältnisses.

Man multiplicirt die nutzbare Stromstärke mit der nutzbaren Spannung, wodurch man die nutzbare Leistung erhält. Ferner bildet man das Product aus der gesammten Stromstärke i_a und der gesammten elektromotorischen Kraft E und erhält dadurch die ganze Leistung. Das elektrische Güteverhältniss wird dann durch das Verhältniss der beiden Producte gebildet.

$$\eta = \frac{ei}{Ei_a}$$

Das Güteverhältniss berücksichtigt nicht den Verbrauch durch Wirbelströme, Hysteresis oder Reibung.

10. Berechnung des mechanischen Wirkungsgrades.

Man bestimme nach den Seite 128 und 129 gegebenen Regeln die wahrscheinlichen Verluste durch Hysteresis und Wirbelströme im Eisen, und schätze die Verluste durch Lagerreibung und Wirbelströme im Kupfer aus Versuchsergebnissen an Maschinen ähnlicher Bauart. Dann dividire man die nutzbaren Watt durch die Gesamtzahl der Watt (einschliesslich der eben erwähnten Verluste).

Magnetische Berechnungen.

11. Berechnung der Magnetisirung im Anker.

Man misst e , addirt dazu den Spannungsverlust und erhält so E , multiplicirt diesen Werth mit 10^8 und dividirt durch nN .

$$\mathcal{S} = \frac{E \cdot 10^8}{n \cdot N}$$

(Beispiel: Bei einer Edison-Hopkinson-Maschine ist $n = 12,5$; $N = 80$; $e = 105$; $r_a i_a = 3,26$; suche \mathcal{S} .)

12. Berechnung der magnetischen Induction \mathcal{B} in einem Eisenkern.

Man bestimmt die Magnetisirung \mathcal{S} im Kern und den Eisenquerschnitt A des Kernes (in Quadratcentimetern) und dividirt nun \mathcal{S} durch A .

$$\mathcal{B} = \frac{\mathcal{S}}{A}$$

(Beispiel: Bei einer Edison-Hopkinson-Maschine ist \mathcal{S} im Anker = 10826000; $A = 806,4$; suche \mathcal{B} . Oder: Bei einer Kapp-Dynamomaschine ist \mathcal{S} im Anker = 6730000; $A = 403,1$; suche \mathcal{B} .)

13. Berechnung des Querschnittes eines Eisenkernes für eine gegebene Zahl magnetischer Linien.

Man bestimmt zunächst die gesammte Zahl der magnetischen Linien, die bei voller Leistung der Maschine durch den Eisenkern treten müssen; diese Zahl sei \mathcal{S} . Dann setzt man den Werth von \mathcal{B} fest, der für die magnetische Induction zweckmässig erscheint. In Gleichstrommaschinen für Glühlicht ist es nicht rathsam, die magnetische Induction \mathcal{B} über 17000 Linien für das Quadratcentimeter zu steigern. In Maschinen für Bogenlicht kann dieser Werth grösser genommen werden. In Wechselstrommaschinen ist ein bedeutend geringerer Grad der Magnetisirung erwünscht, etwa $\mathcal{B} = 7000$. Bei Kernen von Transformatoren ist \mathcal{B} gewöhnlich = 2000 bis 4000.

Wird nun \mathcal{S} durch den festgesetzten Werth von \mathfrak{B} dividirt, so erhält man den Querschnitt A (in Quadratcentimetern).

(Beispiel: Bei einer Phönix-Maschine sollte $\mathfrak{B} = 17800$ und $\mathcal{S} = 2606000$ sein; wie gross ist A zu nehmen? Oder: Bei einem Transformator von Kapp war A des Kernes $= 103,2$ qcm; wählen wir $\mathfrak{B} = 6500$, wie gross ist dann \mathcal{S} ?)

Bei Berechnung des erforderlichen Querschnittes für Feldmagnete verfährt man in ähnlicher Weise, indessen muss man wegen der magnetischen Zerstreung auf eine grössere Zahl magnetischer Linien rechnen, und es ist sogar bei weichen Eisenkernen rathsam, einen etwas geringeren Grad der Magnetisirung vorauszusetzen. Werden gusseiserne Kerne verwendet, so muss der Querschnitt fast zweimal so gross sein; es ist nicht zu empfehlen, mehr als 8000 Linien für das Quadratcentimeter zu rechnen.

14. Zugabe aus Anlass der magnetischen Zerstreung.

Infolge der magnetischen Zerstreung ist die Magnetisirung in verschiedenen Theilen des magnetischen Kreises verschieden.

Beispiel: In einer Maschine von Edison-Hopkinson fand man den Anker von 10825000 Linien durchsetzt, es wurde genügende magnetisirende Kraft angewendet, um 14289000 Linien im Feldmagnet zu erzeugen. Es zerstreuten sich also 3464000 Linien, die nicht durch den Anker traten. Dies bedeutet, dass von je 132 Linien im Feldmagnet nur 100 nutzbar waren und 32 verloren wurden.

Das Zeichen für den Coëfficienten der Zerstreung ist v . Sein Werth ändert sich für verschiedene Maschinen von 1,2 bis 2 und mehr. In dem vorstehenden Beispiel ist also $v = 1,32$.

Wenn die Magnetisirung \mathcal{S} Linien im Anker betragen soll, so müssen danach $v\mathcal{S}$ Linien im Feldmagnet vorhanden sein.

15. Berechnung der Durchlässigkeit des Eisens in irgend einem Zustande.

Dieselbe ist aus Tabellen oder Curven zu entnehmen, welche in ähnlicher Weise wie die auf Seite 118 und 129 gegebenen für die gerade in Frage stehende Eisensorte hergestellt sind.

Beispiel: Bei dem Anker einer Maschine von Kapp sei bei offenem Stromkreis $\mathcal{S} = 6730000$; A sei $= 403,1$ qcm; suche \mathfrak{B} . Hiernach suche μ unter der Annahme, dass die

Curve des verwendeten Eisens die gleiche sei wie die oberste in Figur 85 dargestellte Curve. Ferner bestimme \mathcal{S} und μ , wenn bei voller Belastung \mathcal{S} auf 7170000 angewachsen ist, durch die magnetisirende Kraft der Reihenwicklung.

Ferner: Ein (gusseiserner) Feldmagnet einer Phönix-Maschine habe einen Querschnitt $A = 157,5$ qcm; \mathcal{S} sei $= 2606000$ und $v = 1,36$. Bestimme $v\mathcal{S}$, dann \mathcal{B} , und μ unter Benutzung der Tabelle auf Seite 117 für Gusseisen.

Berechnungen des magnetischen Kreises.

Grundgesetz des magnetischen Kreises.

Die magnetomotorische Kraft dividirt durch den magnetischen Widerstand ist gleich der Magnetisirung.

16. Berechnung der magnetomotorischen Kraft, die zur Durchführung einer gegebenen Zahl magnetischer Linien durch einen bestimmten magnetischen Widerstand erforderlich ist.

Man multiplicirt die den magnetischen Widerstand darstellende Zahl mit der Zahl der Linien, die ihn durchsetzen sollen; das Product ist die Grösse der magnetomotorischen Kraft.

Wird der magnetische Widerstand im Centimetermaass ausgedrückt, so muss die in vorstehender Weise berechnete magnetomotorische Kraft durch $1,257 \left(= \frac{4\pi}{10} \right)$ dividirt werden, wenn man die Zahl der für die magnetisirende Kraft erforderlichen Ampere-Windungen erhalten will.

17. Berechnung des magnetischen Widerstandes eines Eisenkernes.

Der magnetische Widerstand ist direkt proportional der Länge und umgekehrt proportional dem Querschnitt sowie der Durchlässigkeit, demnach

$$\text{magnetischer Widerstand} = \frac{l}{A\mu}$$

Der Werth von μ kann erst eingesetzt werden, wenn er aus \mathcal{B} , wie früher angegeben, berechnet worden ist.

18. Berechnung des gesammten magnetischen Widerstandes im magnetischen Kreise einer Dynamomaschine.

Man berechnet die magnetischen Widerstände der einzelnen Theile und addirt diese Werthe. Mit Rücksicht auf die magnetische Zerstreung muss man indessen den Werth $v\mathcal{S}$ Linien im Kern und Joch des Feldmagnetes in Rechnung setzen.

Im einfachsten Falle besteht der magnetische Kreis aus drei Theilen: 1. dem Eisen im Ankerkern, 2. der Luft, dem Kupfer u. s. w. in den Zwischenräumen und 3. dem Eisen des Feldmagnetes.

Daraus ergibt sich als Werth für die Widerstände im Kreise:

$$\begin{array}{ll} 1. \text{ Anker} & \dots \dots \dots \frac{l_1}{A_1 \mu_1}, \\ 2. \text{ Zwischenräume} & \dots \dots \dots \frac{2 l_2}{A_2 \mu_2}, \\ 3. \text{ Magnetkern} & \dots \dots \dots \frac{l_3}{A_3 \mu_3}. \end{array}$$

Ist das Eisen des Ankers und des Feldmagnetes von gleicher Beschaffenheit, und wird A_3 gleich $v A_1$ angenommen, so dass beide bis zu dem gleichen Grade magnetisirt sind, so ist $\mu_3 = \mu_1$. Für die Zwischenräume ist $v_2 = 1$.

19. Berechnung der Ampere-Windungen der magnetisirenden Kraft, die zur Erzeugung der gewünschten Magnetisirung in den Widerständen des magnetischen Kreises erforderlich sind.

Ampere-Windungen = der Magnetisirung multiplicirt mit dem magnetischen Widerstand, dividirt durch $\frac{4}{10} \pi$ (= 1,257).

Für die Hauptwiderstände erhält man demnach folgende Werthe der Ampere-Windungen:

1. um \mathcal{S} Linien durch das Eisen des Ankers zu führen:

$$\mathcal{S} \cdot \frac{l_1}{A_1 \mu_1} : \frac{4 \pi}{10};$$

2. um \mathcal{S} Linien durch die Zwischenräume zu führen ($\mu_2 = 1$);

$$\mathcal{S} \cdot \frac{2 l_2}{A_2} : \frac{4 \pi}{10};$$

3. um $v \mathcal{S}$ Linien durch das Eisen des Feldmagnetes zu führen:

$$v \mathcal{S} \cdot \frac{l_3}{A_3 \mu_3} : \frac{4 \pi}{10}.$$

Die gesammten Ampere-Windungen betragen demnach:

$$\frac{10}{4 \pi} \mathcal{S} \left(\frac{l_1}{A_1 \mu_1} + \frac{2 l_2}{A_2} + \frac{v l_3}{A_3 \mu_3} \right).$$

Bei einigen Maschinenformen muss der magnetische Widerstand der Polstücke und der Joche besonders berechnet werden,

auch muss man zuweilen Rücksicht auf die Zerstreuung in verschiedenen Theilen des Kreises nehmen.

Die genaue Formel müsste also lauten:

$$AW = \frac{10}{4\pi} \left(\frac{l_1}{A_1\mu_1} + \frac{2l_2}{A_2} + \frac{v_3 l_3}{A_3\mu_3} + \frac{v_4 l_4}{A_4\mu_4} + \frac{v_5 l_5}{A_5\mu_5} \right).$$

Zweckmässig stellt man die Berechnung der Ampere-Windungen zweimal auf. Zunächst benutzt man den Werth \mathcal{S} , der dem Falle entspricht, in dem kein Spannungsverlust herrscht um den Werth für die Ampere-Windungen der Nebenschlusswickelung zu finden, wenn kein Strom durch die Lampen fliesst. Dann benutzt man den Werth \mathcal{S} , der dem maximalen E entspricht, um die vermehrten Ampere-Windungen zu ermitteln, die bei Abnahme des vollen Stromes aus dem Anker erforderlich sind. Hierzu sind bei Maschinen mit gemischter Wickelung noch Reihenwickelungen zuzufügen, welche die zur Ausgleichung der entmagnetisirenden Wirkung des Ankers und des Spannungsverlustes erforderlichen Zusatzwindungen erhalten müssen.

20. Schätzung der zusätzlichen Ampere-Windungen, die zur Ausgleichung der entmagnetisirenden Wirkung des Ankerstromes bei einer Vorwärtsstellung der Bürsten nothwendig sind.

Man zählt die Leiter am Umfange zwischen dem symmetrischen Durchmesser und dem wirklichen Durchmesser der Stromwendung und multiplicirt die Zahl mit der Stromstärke i_a im Anker. Das so gefundene Product muss um einen gewissen Betrag vermehrt werden wegen des Abfalls des magnetischen Potentials, der in den Feldkernen stattfindet und herrührt von der vermehrten magnetischen Streuung und der verminderten Durchlässigkeit. Dieser Betrag kann nicht bestimmt werden ohne die später entwickelten magnetischen Berechnungen. Im Allgemeinen muss das Product um das $1\frac{1}{2}$ bis 2fache vermehrt werden, letzteres bei Ringmaschinen. Zu der so erhaltenen Zahl addirt man die Zahl der früher gefundenen Ampere-Windungen.

Berechnungen für Gleichstrommaschinen.

Wie im Eingange dieses Kapitels bereits gesagt wurde, ist es vortheilhaft, zunächst die Berechnung einiger ausgeführter Maschinen vorzunehmen. Es werden in Folgendem zwei vollständige Beispiele gegeben; eins bezieht sich auf eine Maschine von Edison-Hopkinson

(vergl. Seite 138, 142 und in Kapitel XVII), das andere auf eine Maschine von Kapp (Tafel II).

Als drittes Beispiel wird dann noch eine Berechnung zur Übung gegeben.

I. Beispiel. Maschine von Edison-Hopkinson.

Unter Benutzung der Abhandlung von J. und E. Hopkinson in den Philos. Transactions für 1886 (vergl. Fig. 287).

Nebenschlussmaschine mit Trommelanker: 33 Kilowatt Leistung, 320 Ampere, 105 Volt, 750 Umläufe in der Minute.

Anker: Besteht aus 1000 eisernen Kernplatten, die aus weichem Eisenblech gestanzt sind, isolirt durch Papierblätter; die Scheiben werden zwischen zwei Endplatten gefasst; eine der letzteren wird durch eine auf der Achse festsitzende Scheibe gehalten, die andere durch eine auf der Achse befindliche Mutter mit Gegenmutter. Die Welle besteht aus Bessemer-Stahl und ist vor der Aufbringung der Kernplatten isolirt worden.

Kernscheiben, äusserer Durchmesser	24,5 cm,
» innerer Durchmesser	7,62 »
Durchmesser der Welle	6,985 »
Radiale Tiefe des Eisens	8,45 »
Gesamte Kernlänge	50,8 »
Gesamte Stärke der Papierisolation	3,4 »
Eisenlänge im Kern	47,4 »
Eisenquerschnitt ($2 \cdot 8,45 \cdot 47,4 =$)	801 qcm,
Eisenquerschnitt unter Berücksichtigung der Durchlässigkeit der Welle	810 »

Der Kern besitzt 40 Windungen (d. h. 80 Leiter am Umfange), jede aus 16 Litzen von Kupferdraht (1,753 mm stark) bestehend, die Windungen liegen in zwei Lagen zu je 20. Der Stromabgeber besteht aus 40 durch Glimmer isolirten Stäben, die Verbindungen am Anker sind so hergestellt, dass bei offenem Kreise die Ebene der Stromwendung horizontal liegt. Der Querschnitt des Drahtes beträgt 2,4 qmm, der jeder Litze von 16 Drähten 38 qmm, der Widerstand des Ankers von Bürste zu Bürste 0,009947 Ohm bei 13,5 Grad C.

Der Feldmagnet besteht aus drei Schmiedestücken von Schweisseisen, die gut bearbeitet und zusammengebolzt sind; der Querschnitt der Schenkel ist rechteckig, die Ecken sind leicht abgerundet. Der Magnet steht auf einer Fussplatte von Zink über einer Bodenplatte aus Gusseisen.

Länge der Magnetschenkel	45,7 cm,
Schenkelbreite (parallel zur Welle)	44,45 »
Schenkelstärke	22,1 »
Jochlänge	61,6 »
Jochbreite	48,3 »
Jochdicke	23,2 »
Abstand der Schenkelmittelpunkte	38,1 »
Durchmesser der Ausbohrung der Polflächen	27,5 »
Tiefe der Polstücke	25,4 »
Breite eines Polstückes am schmalsten Theil .	21,3 »
Breite der Polstücke (parallel zur Welle) . .	48,3 »
Breite des Zwischenraumes zwischen den Pol-	
stücken	12,7 »
Tiefe der Kanten der vorspringenden Hörner	0,8 »
Weite des Zwischenraumes (von Eisen zu Eisen)	1,5 »
Dicke der Zinkplatte	12,7 »
Winkelweite der Polfläche	129 Grad,
Winkelweite des Zwischenraumes	51 »

Die magnetisirende Wickelung ist unmittelbar auf den Schenkeln angebracht; sie besteht auf jedem Schenkel aus 11 Lagen Kupferdrahtes von 2,413 mm Stärke (Querschnitt 4,573 qmm) mit insgesamt 3260 Windungen; die gesammte Drahtlänge beträgt 4570 m, der Widerstand 16,93 Ohm bei 13,5 Grad C.

Angaben zur Berechnung des magnetischen Kreises.

1. Ankerkern. Der Abstand der Polflächen an den vorspringenden Hörnern beträgt 12,7 cm; für den Weg der Kraftlinien im Ankerkern wird demnach nur wenig mehr einzusetzen sein:

$$l_1 \text{ wird angenommen zu } 13 \text{ cm,}$$

$$A_1 \text{ » » » } 810 \text{ qcm.}$$

2. Zwischenraum.

$$l_2 \text{ wird angenommen zu } 1,5 \text{ cm,}$$

$$A_2 \text{ » » » } 1600 \text{ qcm.}$$

Der wirkliche Inhalt der Poloberfläche beträgt 1513 qcm; die dem Winkel von 129 Grad entsprechende Oberfläche des Ankerkernes beträgt 1410 qcm. Es wird angenommen, dass das magnetische Feld sich um etwa $\frac{4}{5}$ der Stärke des Luft-raumes seitwärts über die geometrische Grenze des berechneten Gebietes ausbreitet und um 190 cm mehr Flächenraum einnimmt, als letzteres.

3. Magnetschenkel.

l_3 ist gleich $2 \cdot 45,7 = 91,4$ cm,

A_3 » » 980 qcm.

4. Joch. Ganze Länge 61,6 cm; da die beiden äussersten Theile des Joches von dem grössten Theile der Kraftlinien nicht durchströmt werden, so setzt man nur einen Theil der ganzen Länge ein, indem man zugleich die Biegung der Kraftlinien veranschlagt:

l_4 wird angenommen zu 49 cm,

A_4 ist gleich 1120 qcm.

5. Polstücke.

l_5 ist gleich 11 cm (längs des vermuthlichen Weges der Kraftlinien),

A_5 wird angenommen zu 1230 qcm als mittlerer Werth zwischen dem Querschnitt des Schenkels und dem Inhalt der Polfläche.

Der Coëfficient v der Zerstreung wurde von Hopkinson zu 1,32 angenommen, stellte sich aber wahrscheinlich auf annähernd 1,4.

Berechnungen.

$$i = 320; e = 105; n = \frac{750}{68} = 12,5; r_a = 0,01; r_s = 16,93,$$

also $i_s = \frac{e}{r_s} = 6,21; i_a = i + i_s = 326; \text{Spannungsverlust } r_a i_a = 0,01.$

$326 = 3,26; \text{daher } E = e + r_a i_a = 108,26 \text{ Volt bei voller Belastung. } C = 80.$

$$\mathfrak{C} = \frac{E \cdot 10^8}{n C} = \frac{108,26 \cdot 10^8}{12,5 \cdot 80} = 10826000.$$

$$\text{Zahl der nutzbaren Watt} = e i = 105 \cdot 320 = 33600,$$

$$\text{Zahl der gesammten Watt} = E i_a = 108,26 \cdot 326 = 35293,$$

$$\text{Güteverhältniss } \eta = 0,952 = 95,2 \text{ Proc.},$$

$$\text{Verlust an Watt im Anker} = 3,26 \cdot 326 = 1063,$$

$$\text{» » » » Magnet} = 6,21 \cdot 105 = 652,$$

» » » durch Hysteresis bei 12,5 Umkehrungen in der Secunde und bei einem Werthe von 13360 für \mathfrak{B} (vergl. Seite 132) = 86,3.

Ampere-Windungen.

$$AW = \frac{10}{4\pi} \cdot 10826000 \text{ mal dem gesammten magnetischen Widerstand.}$$

Der Widerstand ist aus fünf Angaben (Seite 137) für den magnetischen Kreis zu berechnen, da verschiedene Theile zu berücksichtigen sind. Man bestimmt zuerst die Werthe von \mathfrak{B} in den verschiedenen Theilen unter Berücksichtigung des Querschnittes und der Zerstreung und stellt aus diesen nach Seite 118 μ fest.

- | | |
|------------------------|---|
| 1. Anker | $\mathfrak{B}_1 = 13360$; $\mu_1 = 1000$, |
| 3. Magnetschenkel . . | $\mathfrak{B}_3 = 14250$; $\mu_3 = 796$, |
| 4. Joch | $\mathfrak{B}_4 = 13530$; $\mu_4 = 895$, |
| 5. Polstücke | $\mathfrak{B}_5 = 11450$; $\mu_5 = 1566$. |

Unter Benutzung dieser Methode und der Zerstreungscoefficienten erhält man die magnetischen Widerstände:

- | | |
|--------------------------------|----------------------|
| 1. im Anker | 0,00001605, |
| 2. in den Zwischenräumen . . | 0,00187500, |
| 3. in den Magnetschenkeln . . | 0,00015467, |
| 4. im Joch | 0,00006845, |
| 5. in den Polstücken | 0,00000151, |
| | zusammen 0,00211568, |

daher
$$AW = \frac{10}{4\pi} \cdot 10826000 \cdot 0,00211568 = 18226.$$

Hierzu sind die Ampere-Windungen zu addiren, die zur Ausgleichung der entmagnetisirenden Wirkung des Ankerstromes dienen. Die Zahl der Ankerleiter zwischen den Polspitzen beträgt 11; da aber der Durchmesser der Stromwindung nicht dicht an den Polspitzen liegt, nehmen wir 9 als entmagnetisirenden Gürtel an. Man multiplicirt diesen Werth mit der halben Stromlänge (163 Ampere) und mit dem Zerstreungscoefficienten (1,32) und erhält 1936 als die Ausgleichszahl, so dass die Gesamtzahl der Ampere-Windungen 20162 beträgt. Dividirt man diese Zahl durch die Stromstärke im Nebenschluss (6,21), so ergeben sich 3214 Windungen für den Feldmagnet. Die wirkliche Zahl beträgt 3260, lässt also einen Spielraum zur Regulirung.

II. Beispiel. Dynamomaschine von Kapp.

Beschreibung: Gemischt gewickelte Maschine mit Trommelanker 21 Kilowatt, vergl. Tafel II, Fig. 259.

Leistung: 200 Ampere, 105 Volt bei 780 Umläufen in der Minute.

Der auf Seite 289 beschriebene Anker hat folgende Abmessungen:

Aeusserer Durchmesser der Kernscheiben . .	28,2 cm,
Innerer » » » . .	19 »
Durchmesser der Welle	7,1 »

Radiale Tiefe des Eisens	6,03 cm,
Kernlänge	40,6 »
Gesamnte Stärke der Papierisolation	7,3 »
Eisenlänge im Kern	33,3 »
Querschnitt des Eisens	402 qcm,
Länge l_1	14 cm.

Einzelheiten der Leiter u. s. w.:

Zahl der Leiter	120,
Breite eines Leiters	0,279 cm,
Radiale Tiefe eines Leiters	0,528 »
Querschnitt der beiden Leiter	0,297 qcm,
Gesamt-Durchmesser der Wickelung	29,6 cm.

Der Widerstand des Ankers von Bürste zu Bürste beträgt 0,025 Ohm, bei der Temperatur, welche der Anker im Betriebe annimmt.

Der Stromabgeber besteht aus 60 durch Glimmer isolirten Segmenten.

Die Leiter sind an den Enden durch halbkreisförmige Verbindungsstücke von 4,1 cm Breite und 0,127 cm Dicke miteinander vereinigt (Tafel II). Der Feldmagnet besteht aus zwei schmiedeeisernen Schenkeln, welche mit dem gusseisernen Joch verbolzt sind (Fig. 259).

Die Nebenschlusswicklung besteht aus runden Kupferdrähten, deren Durchmesser 0,165 cm, und mit Isolation 0,2 cm beträgt. Auf jedem Schenkel befinden sich elf Lagen dieses Drahtes; die Windungen beider Schenkel sind hintereinander geschaltet. Jede Lage hat 139 Windungen, so dass der Nebenschluss im Ganzen $139 \cdot 11 \cdot 2 = 3058$ Windungen enthält.

Die Reihenwicklung besteht aus 23 Wickelungen eines Kupferbandes von $1,219 \cdot 0,330 = 0,402$ qcm Querschnitt auf jedem Schenkel. Die Reihenwicklung beider Schenkel ist parallel geschaltet.

Der Widerstand der Nebenschlusswicklung ist bei voller Belastung = 30,1 Ohm, derjenige der Reihenwicklung = 0,0079 Ohm.

Es sollen nun zwei vollständige Berechnungen angestellt werden, einmal für den Leerlauf, das andere Mal für den Fall der vollen Belastung bei 200 Ampere. Im ersten Falle ist die ganze im Anker erzeugte E. M. K. an den Klemmen der Maschine verfügbar, da keine

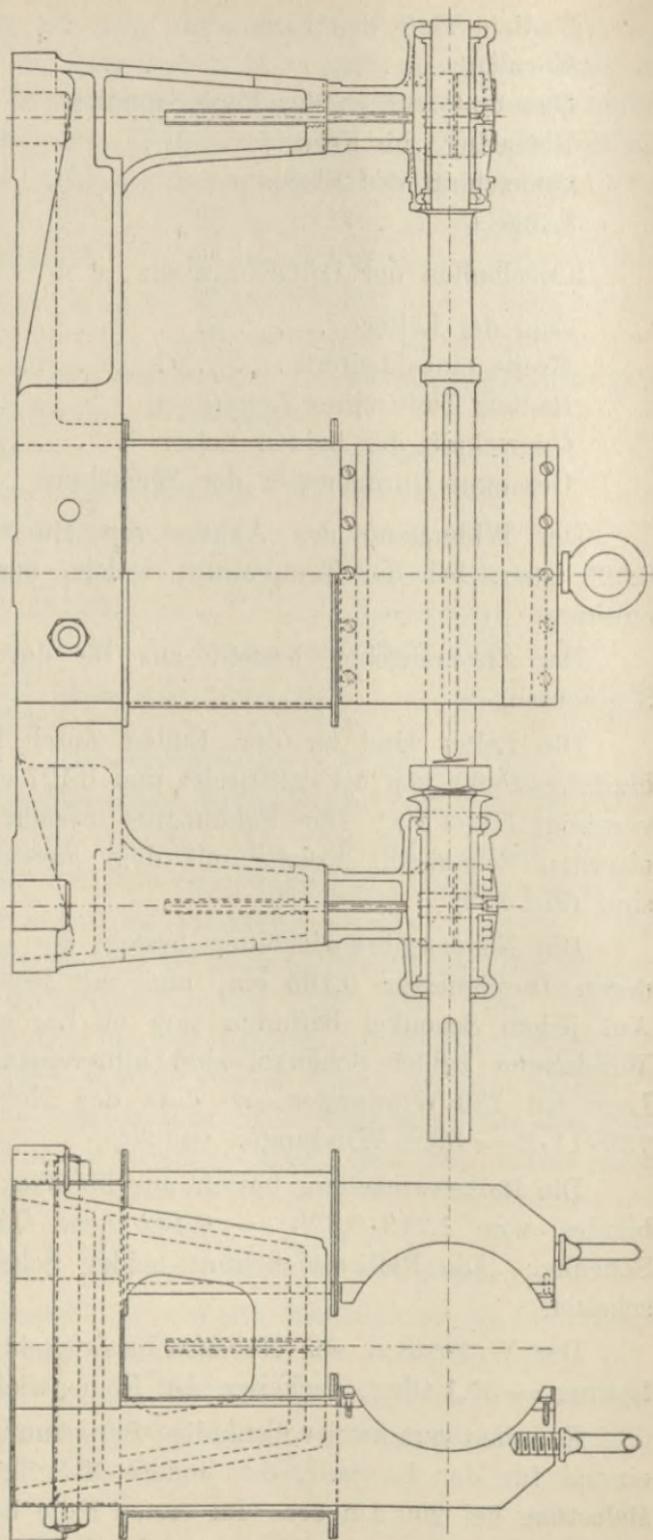


Fig. 259. Plan und Ansicht des Feldmagnetes der zweipoligen Trommelmaschine (Tafel II).

Breite der Schenkel (parallel zur Achse)	38,1 cm,	Breite des Joches	43,2 cm,
Tiefe der Schenkel	17,8 "	Tiefe des Joches	26,8 "
Ganze Länge der Schenkel	76,2 "	Länge des Joches (zwischen den Schenkeln)	17,8 "
Effektive Länge der Schenkel l_3	58,4 "	Durchmesser der Polflächenbohrung	30,3 "
Von Mitte zu Mitte Schenkel	31,2 "	Abstand der Polhörner an der engsten Stelle	8,1 "
Streuungscoefficient bei offenem Stromkreis	1,3,	Winkelweite der Polflächen	135 Grad.
Streuungscoefficient bei voller Belastung	1,4.		

Ankerreactionen vorhanden sind. Im zweiten Falle ist die E. M. K. geringer wegen des Ankerwiderstandes; ferner sind hier Ankerreactionen in Betracht zu ziehen, welche das Feld verzerren und Entmagnetisirung bewirken. Diese beiden Wirkungen aufzuheben ist die Aufgabe der Hauptstromwicklung.

Berechnung bei offenem Stromkreise.

Anker. Die erste Aufgabe ist, die Zahl der Kraftlinien zu bestimmen, welche durch den Anker gehen müssen, damit 105 Volt in ihm erzeugt werden.

Setzen wir in die Formel

$$\mathcal{E} = \frac{E \cdot 10^8}{nN}$$

die gegebenen Werthe ein, so erhalten wir

$$\mathcal{E}_1 = \frac{60 \cdot 105 \cdot 10^8}{780 \cdot 120} = 6732000 \dots \dots \dots (a)$$

Theilen wir diese Zahl durch den Querschnitt des Ankers, so erhalten wir die magnetische Induction \mathfrak{B} im Eisenkern.

$$\mathfrak{B}_1 = \frac{6732000}{402} = 16700 \dots \dots \dots (b)$$

Aus der entsprechend Figur 85 hergestellten Curve für das verwendete Schmiedeeisen sei ermittelt, dass bei dieser Stromdichte

$$\mu_1 = 210 \dots \dots \dots (c)$$

ist.

Feldmagnete. Um die Zahl der durch die Feldmagnete tretenden Kraftlinien zu bestimmen, brauchen wir den oben für den Anker gefundenen Werth \mathcal{E}_1 nur mit dem Streuungscoëfficienten v zu multipliciren, den wir zu 1,3 bestimmt haben. Also

$$\mathcal{E}_2 = 6732000 \cdot 1,3 = 8750000 \dots \dots \dots (d)$$

Dieser Werth dividirt durch den Querschnitt der Schenkel giebt die Stromdichte

$$\mathfrak{B}_2 = \frac{8750000}{677} = 12900 \dots \dots \dots (e)$$

Dieser Werth entspreche nach der Curve (Fig. 85) einem Werthe von

$$\mu_2 = 1230 \dots \dots \dots (f)$$

Für das Joch, dessen Querschnitt $43,2 \cdot 26,8 = 1160$ qcm ist, seien die betreffenden Werthe

$$\mathfrak{B}_3 = \frac{8750000}{1160} = 7540 \dots \dots \dots (g)$$

und (aus der Curve für Gusseisen)

$$\mu_3 = 125 \dots \dots \dots (h)$$

Bei dieser Berechnung ist zu bemerken, dass die Polstücke in die Magnetschenkel eingerechnet sind, was bei dieser Art von Maschinen, ohne grossen Irrthum zu begehen, zugänglich ist.

Magnetischer Widerstand. Nunmehr sind die für jeden Theil des magnetischen Kreises erforderlichen Amperewindungen zu bestimmen; dies geschieht durch Ermittlung der magnetischen Widerstände nach der oben gegebenen Formel: magnetischer Wider-

$$\text{stand} = \frac{l}{A\mu}.$$

Danach erhalten wir für den Anker

$$\frac{14,0}{403 \cdot 210} = 0,0001654 \quad \dots \quad (i)$$

für die Magnetschenkel

$$\frac{2 \cdot 58,4}{677 \cdot 1230} = 0,0001415 \quad \dots \quad (j)$$

für das Joch

$$\frac{17,8}{1160 \cdot 125} = 0,0001228 \quad \dots \quad (k)$$

Luftzwischenraum. Die Länge des Luftzwischenraumes ist 1,1 cm; der Inhalt der Poloberfläche ist zu bestimmen aus dem Durchmesser der Ausbohrung, der Winkelweite der Polfläche und der Breite des Magnets zu:

$$\begin{aligned} & 38,1 \cdot \pi d \cdot \frac{135}{360} \\ & = 38,1 \cdot \pi \cdot 30,3 \cdot \frac{135}{360} = 1360 \text{ qcm} \end{aligned}$$

Correction wegen der Wickelung des Ankerkernes. Man merke sich folgende praktische Regel: Füge zu dem wirklichen Inhalt der Poloberfläche eine Fläche, deren Länge gleich dem Umfang der Poloberfläche und deren Breite gleich der Länge des Luftzwischenraumes, multiplicirt mit 0,8, ist. Der Umfang der Polfläche ist = $2(38,1 + 35,5)$ cm, also

$$\text{die Correction} = 2 \cdot 73,6 \cdot 1,1 \cdot 0,8 = 130 \text{ qcm} \quad \dots \quad (l)$$

Der effective Inhalt der Poloberfläche beträgt daher $1360 + 130 = 1490$ qcm, und der Widerstand des Luftzwischenraumes demnach

$$\frac{2 \cdot 1,1}{1490} = 0,0015 \quad \dots \quad (m)$$

Berechnung der Amperewindungen.

Nunmehr ist noch die Zahl der Amperewindungen oder die magnetomotorische Kraft zu bestimmen, welche im Stande ist, die gegebene Zahl der Kraftlinien durch die verschiedenen Theile des

die gleiche wie vorher sein soll, eine um diesen Abfall grössere elektromotorische Kraft leisten. Der Spannungsabfall im Anker und der Reihenwicklung ergibt sich durch Multiplication des Widerstandes mit dem Strom zu

$$200 (0,025 + 0,0079) = 6,58 \text{ Volt.}$$

Die insgesamt von der Maschine zu erzeugende E. M. K. ist demnach bei voller Belastung

$$\text{E. M. K.} = 105 + 6,58 = 111,58 \text{ Volt.}$$

Durch dieselben Berechnungen, wie sie vorher entwickelt wurden, ergibt sich also unter Zugrundelegung des neuen Werthes der E. M. K. folgendes:

Kraftlinien durch den Anker

$$\mathcal{S}'_1 = \frac{60 \cdot 111,58 \cdot 10^8}{780 \cdot 120} = 7153000 \quad . . . \quad (a')$$

Magnetische Stromdichte im Anker

$$\mathfrak{B}'_1 = \frac{7153000}{403} = 17800 \quad . . . \quad (b')$$

Dieser magnetischen Stromdichte entspricht

$$\mu'_1 = 100 \quad . . . \quad (c')$$

Kraftlinien durch die Feldmagnete

$$\mathcal{S}'_2 = 7153000 \cdot 1,3 = 9298000 \quad . . . \quad (d')$$

Magnetische Stromdichte in den Schenkeln

$$\mathfrak{B}'_2 = \frac{9298000}{677} = 13740 \quad . . . \quad (e')$$

Dementsprechend

$$\mu'_2 = 950 \quad . . . \quad (f')$$

Magnetische Stromdichte im Joch

$$\mathfrak{B}'_3 = \frac{9298000}{1160} = 8000 \quad . . . \quad (g')$$

und

$$\mu'_3 = 95 \quad . . . \quad (h')$$

Magnetische Widerstände.

Anker $\frac{14}{402 \cdot 100} = 0,0003474 \quad . . . \quad (i')$

Luftzwischenraum $= 0,0015$ (wie vorher).

Schenkel $\frac{2 \cdot 58,4}{677 \cdot 950} = 0,0001816 \quad . . . \quad (j')$

Joch $\frac{17,8}{1160 \cdot 95} = 0,0001615 \quad . . . \quad (k')$

Berechnete Amperewindungen.

Anker	$AW = \frac{0,0003474 \cdot 7\ 153\ 000}{1,257}$	
	$= 1977$	(n')
Luftzwischenraum	$AW = \frac{0,0015 \cdot 7\ 153\ 000}{1,257}$	
	$= 8535$	(o')
Schenkel	$AW = \frac{0,0001816 \cdot 9\ 298\ 000}{1,257}$	
	$= 1342$	(p')
Joch	$AW = \frac{0,0001615 \cdot 9\ 298\ 000}{1,257}$	
	$= 1195$	(q')
Also-Gesammtzahl der Amperewindungen	$= 13\ 049$	

Wir sehen, dass 13049 Amperewindungen statt 10687 erforderlich sind, um die im Anker verzehrte Spannung auszugleichen. Aber selbst diese Zahl wird nicht ausreichen, das Verlangte zu leisten, und zwar wegen der entmagnetisirenden Wirkung, welche der Anker ausübt. Es liegen nämlich acht Ankerleiter in dem Winkel, um welchen die Bürsten verschoben werden müssen, diese geben mit dem Strome multiplicirt 1600 Amperewindungen, welche eine entmagnetisirende Wirkung ausüben. Wir sehen aus (n') und (o') oben, dass 10512 Amperewindungen erforderlich sind, um die Induction durch den Anker und die Luftzwischenräume zu treiben. Hierzu muss ein 1600 Amperewindungen entsprechendes Potential addirt werden, um die entmagnetisirende Wirkung des Ankers aufzuheben. Wenn nun das magnetische Potentialgefälle zwischen den Polen um diesen Betrag erhöht wird, steigt entsprechend die magnetische Streuung. Der Coëfficient derselben liegt demnach näher an 1,4 als an 1,3. Das bedeutet, dass die Kraftlinienzahl in den Schenkeln und im Joch auf etwa 10000000 steigt. Nehmen wir die magnetische Stromdichte in den Schenkeln zu 14730 und im Joch zu 8600 an, so werden μ_2' und μ_3' sinken, beispielsweise auf 750 bzw. 75, die Zahl der Amperewindungen würde dann in diesen Theilen auf 1800 bzw. 1500 steigen. Addiren wir nun die gesammten Amperewindungen, so erhalten wir die Zahl 15400.

Nachdem wir so die Berechnungen durchgeführt haben, wollen wir die Ergebnisse als Muster für künftige Berechnungen in ein Schema eintragen.

		\mathfrak{B}	μ	Widerstand	Nothwendige Ampere- windungen
Offener Kreis	1. Anker	16 700	210	0,0001654	883,5
	2. Zwischenraum	4 520	1	0,0015	7 975
	3. Magnetschenkel . . .	12 900	1230	0,0001415	976,1
	4. Joch	7 540	125	0,0001228	852,5
				Summa	10 687
Volle Belastung	1. Anker	17 800	100	0,0003474	1 977
	2. Zwischenraum	4 800	1	0,0015	8 536
	3. Magnetschenkel . . .	14 730	750	0,0002278	1 800
	4. Joch	8 600	75	0,0002046	1 500
				Summa	13 813
	Hierzu als Gegengewicht gegen die Entmagnetisirung				1 600
					Insgesamt 15 413

Wirkliche Amperewindungen.

Die wirkliche Erregung der Maschine betrug:

$$\begin{aligned}
 &\text{Amperewindungen im Nebenschluss} &&= 10670 \text{ (wie vorher)} \\
 &\quad \text{» in der Reihenwicklung} && \\
 & &&= 23 \cdot 200 = 4600 \\
 & &&\text{zusammen } \underline{15270}
 \end{aligned}$$

In der Praxis lässt sich die Zahl der in Reihe zu schaltenden Amperewindungen nicht in der Genauigkeit wie in diesem Beispiel vorausbestimmen. Gewöhnlich wickelt man eine angenäherte Zahl von Windungen auf, lässt den Anker umlaufen und bestimmt auf diesem Wege genau die Zahl der Amperewindungen, welche erforderlich sind, um die gewünschte Spannung bei voller Belastung zu erhalten.

III. Beispiel. Entwurf einer Compound-Dynamomaschine

mit Trommelanker im einfachen Felde (z. Th. bereits früher behandelt). Leistung 200 Ampere bei 55 Volt und 1140 Umdrehungen in der Minute. Es soll ein passendes Feldmagnetsystem entworfen werden.

Anker. Aus Kernscheiben bestehend, welche durch gefirnisstes Manillapapier voneinander getrennt und auf eine mit drei Speichen versehene Rothgussbüchse aufgeklemmt sind. Die Welle besteht aus Siemens-Martin-Stahl; der Stromwender aus 36 Theilen. Um den Anker sind 72 Leiter in einer Lage angeordnet. Bei voller Belastung muss daher $\mathfrak{C} = 4170000$ Linien sein. Rechnen wir 14400 Linien auf 1 qcm, so muss der Kern einen Netto-Querschnitt von 280 qcm haben. Kernscheiben von 18,4 cm äusserem und

10,8 cm innerem Durchmesser würden bei einer Netto-Länge des Ankers von 38,1 cm diesen Querschnitt liefern. Bei einer Dicke der Scheiben von 0,07 cm würden hierzu 536 Stück erforderlich sein.

Die Ankerleiter, siebenlitzige Drähte, doppelt mit Seide umspinnen und leicht gefirnisst, sollen von Bürste zu Bürste 0,007 Ohm Widerstand haben; ihre ganze Länge betrage annähernd 46 m.

Feldmagnete. Die Polstücke aus bestem, sorgfältig geglühtem Gusseisen liegen horizontal, das untere bildet einen Theil der gusseisernen Fussplatte. Der Querschnitt verbreitert sich nach den Polen zu, wo er 1250 qcm beträgt, während er an den von dem Anker entferntesten Stellen bei einer Breite von 41,9 cm und einer Tiefe von 27,9 cm 1170 qcm hat. An diesen Stellen befinden sich Ausbohrungen zur Aufnahme der Enden des schmiedeeisernen Magnetkernes, welcher aus einem runden Schmiedestück von 26,7 cm Durchmesser besteht. An den Enden, soweit sie in die horizontalen Polschuhe eingelassen sind, ist der Kern auf 25,4 cm abgedreht. Die fertig montirte Maschine gleicht im Allgemeinen der in Figur 102 dargestellten, die Feldmagnete sind aber massiver. Um die geeignete Länge dieses Kernstückes zu finden, macht man zunächst eine annähernde Schätzung der erforderlichen Zahl von Amperewindungen und berechnet danach den Wickelungsraum und die Länge des Kernes. Dann entwirft man den magnetischen Kreis so gedrängt als möglich. Hat man so zunächst die Grössen der einzelnen Theile überschläglich festgestellt, so berechnet man nun in der Weise, wie es oben an dem Beispiel gezeigt wurde, genauer die Zahl der erforderlichen Amperewindungen für offenen Stromkreis und für volle Belastung.

Ein Beispiel einer sehr ausführlichen Berechnung einer Dynamomaschine giebt Wiener in der *Electrical World*, Bd. 25, S. 662, vom 8. Juni 1895.

Erfahrene Constructeure, die mit bestimmten Maschinentypen und Eisensorten zu arbeiten gewohnt sind, können ihre Berechnungsmethoden sehr vereinfachen. Sie werden auf Grund ihrer Erfahrung ihre Maschinen mit bestimmten Stromdichten in den Kernen der Anker und Magnete — also mit bekannten Durchlässigkeiten entwerfen. Sie können dann die für jedes Centimeter Länge in jedem Theile des magnetischen Kreises erforderliche Zahl von Amperewindungen feststellen und an der Hand ihrer Zeichnungen in wenigen Augenblicken die für irgend eine Erregung erforderliche Gesamtzahl der Amperewindungen bestimmen.

Nützliche Winke für den Entwurf einer Maschine.

Umlaufgeschwindigkeit. Bei Trommel- und cylindrischen Ringankern scheint die Umfangsgeschwindigkeit gewöhnlich 13,5 bis 15 m in der Secunde zu betragen. Für Trommelanker mit einer Leistung von K Kilowatt kann eine passende Geschwindigkeit nach der Formel

$$v = \frac{15 K}{K + 1}$$

bestimmt werden. Für grosse, langsam laufende Ringmaschinen kann man nehmen

$$v = \frac{13,5 \cdot K}{K + 5}$$

Nach Esson lassen sich bei grossen Maschinen 30 m in der Secunde ohne Bedenken erzielen. Für scheibenförmige Ringanker und für Scheibenanker ist eine Geschwindigkeit von 16 bis 25 m in der Secunde gebräuchlich. Die Anker von Ferranti (Fig. 418) haben eine Umfangsgeschwindigkeit von etwa 24 m in der Secunde. Diejenigen Wechselstrommaschinen, in denen der Feldmagnet umläuft, können bei passender Bauart eine höhere Umfangsgeschwindigkeit erhalten, ohne dass Gefahr eintritt. Bei einigen übersteigt die Geschwindigkeit 35 m in der Secunde. Bei den Niagara-Wechselstrommaschinen beträgt die Umfangsgeschwindigkeit etwa 39 m in der Secunde.

Kernscheiben. Dieselben sind in der Regel 0,5 bis 0,6 mm stark bei Gleichstrommaschinen und Motoren; für Wechselstrommaschinen wählen manche Constructeure die Scheiben noch dünner.

Bei Ringen beträgt das praktische Verhältniss zwischen äusserem und innerem Durchmesser 10 : 8 für kleine Ringe, bis 10 : 7 für grosse Ringe. Bei den vierpoligen Ringen von Brown (Fig. 276) beträgt das Verhältniss 10 : 7; in seinen achtpoligen Ringen (Fig. 279) etwa 10 : 8. Bei den Maschinen mit innern Magneten (Tafel VIII) von Siemens stellt sich das Verhältniss etwa auf 10 : 9. Für Maschinen mit gusseisernen Magneten werden die Ringe in der Regel mit einer geringeren radialen Tiefe des Eisens hergestellt als für Maschinen mit Magneten aus Schmiedeeisen.

Bei zweipoligen Trommeln beträgt das gebräuchliche Verhältniss des äusseren und inneren Durchmessers 10 : 3. In der zweipoligen Maschine von Kapp (Tafel II) beträgt es 7 : 4. Bei vielpoligen Trommelmaschinen ist die innere Weite gewöhnlich grösser. Bei dem vierpoligen Trommelanker (Fig. 237) ist das Verhältniss 5 : 3.

Grenze der Magnetisirung. Die Grenzwerte, bis zu denen man in der Praxis die Magnetisirung zweckmässig steigert, sind bereits verschiedene Male erwähnt worden.

Nachstehend sind die Werthe von \mathfrak{B} zusammengestellt. In der Regel sind die höheren Werthe von \mathfrak{B} nur bei den grösseren Maschinen zulässig¹⁾. Es scheint, dass die Stromdichten im Luftzwischenraume höher sind, wenn die Pole aus Schmiedeeisen oder Stahl bestehen, als bei Polen aus Gusseisen.

\mathfrak{B} = Linien für 1 gem				
Maschinenart	im Anker	im Zwischenraum	im Feldmagnet	
			für Schmiedeeisen	für Gusseisen
Maschine für Gleichspannung mit zweipoliger Trommel . .	10000—15000	2500—6500	12000—17000	6000—8000
mit zweipoligem Ring (langer Ring)	12000—16000	2500—5000	desgl.	desgl.
vielpol. Ringmaschine	10000—15000	3000—5000	desgl.	desgl.
Maschine für Bogenlicht	17000—20000	3000—7000	17000—20000	6000—10000
Maschinen zum Laden von Akkumulatoren	10000—13000	4000—6000	10000—15000	5000—7000
Wechselstrom-Maschinen mit vielpoligem Ring	6000—6500	2500—4000	12000—17000	6000—8000
mit Trommel	6000—7000	2500—5000	desgl.	desgl.
mit kernlos. Scheiben	5000	5000	12 000	6000

Günstigste Ausnutzung des Kupfers. Diejenigen Maschinen, bei welchen das Material am vortheilhaftesten ausgenutzt ist, werden die grösste Leistung im Verhältniss zum Gewicht aufweisen. Betrachten wir zunächst nur das Kupfer im Anker, so wird natürlich die Leistung auf das Kilogramm Kupfer um so grösser sein, je dichter das Feld und je grösser die Geschwindigkeit ist. Nehmen wir eine durchschnittliche Feldstärke von 3000 Linien auf das Quadratcentimeter an, so schwankt die Zahl der Watt auf das Kilogramm Kupfer von unter 100 bei vielpoligen Ringmaschinen mit

1) Vergl. Wiener's Statistik in der Electrical World, Bd. 23, S. 713, 1894; dort wird aber die irrthümliche Voraussetzung gemacht, dass Zähne in den Kernen Streuungsverluste im Anker hervorrufen.

geringer Tourenzahl bis zu 500 oder 600 bei zweipoligen Trommelmaschinen mit grosser Tourenzahl.

Die Drahtlänge, welche eine bestimmte Spannung bei einer gegebenen Umdrehungszahl liefert, ist (umgekehrt) ein Maass für die Dichte des magnetischen Feldes. Nachstehend einige Beispiele von zweipoligen Dynamomaschinen mit Trommelwicklung: Edison-Hopkinson nimmt bei 750 Umdrehungen in der Minute 48,2 cm für jedes Volt; Kapp bei 780 Umdrehungen 89 cm; Thomson-Houston (Bogenlichtmaschinen) bei 900 Umdrehungen 376 cm. Bei einer Umfangsgeschwindigkeit von 15 m in der Secunde in einem Felde von der Dichte = 6000 leistet jedes Centimeter der Leiter ungefähr $\frac{1}{10}$ Volt.

Abmessung des Drahtes für die Ankerwicklung. Dies wird unter der Ueberschrift »Zulässige Erwärmung« (Seite 350) eingehender behandelt werden. Die neuere Praxis gestattet in Ringankern 310 bis 465 Ampere für das Quadratcentimeter Querschnitt, bei aus nur einer Lage bestehenden Wicklungen sogar bis zu 620 Ampere für das Quadratcentimeter, während für die Magnetwicklung nur etwa 310 Ampere für das Quadratcentimeter zugelassen werden. Esson¹⁾ hat eine sehr nützliche Tabelle aufgestellt, welche die zu normalen Ankerwicklungen vorzugsweise gebrauchten Drahtsorten enthält nebst der Zahl von Lagen, welche bei den angegebenen Stromstärken, ohne Ueberhitzung befürchten zu müssen, angewendet werden können.

Erhitzung der Magnetwicklungen. Jede Wicklung erhitzt sich während des Betriebes infolge des Widerstandes, den auch das reinste Kupfer der Bewegung des elektrischen Stromes darbietet. Nimmt man an, dass die Stärke der Isolirschicht proportional der Drahtstärke sei, so folgt daraus, dass das Kupfergewicht in einer Spule von gegebenen Abmessungen bei Anwendung eines starken oder eines dünnen Drahtes gleich bleibt. Im Weiteren wird bei gegebenem Inhalt einer Wicklung der Widerstand sich direct wie das Quadrat der Windungszahl der Wicklung ändern. Denn wickelt man eine Spule z. B. aus 100 Windungen eines gegebenen Drahtes und die gleiche Spule mit 200 Windungen eines Drahtes von der Hälfte des Querschnittes, so ist der Widerstand der neuen Wicklung offenbar viermal so gross, als der Widerstand der ersten Wicklung. Es ergibt sich auch, dass der Widerstand einer Wicklung von

1) Electr. Review, Bd. 27, S. 546. 1891.

gegebenem Volumen sich umgekehrt wie das Quadrat der Querschnittes des benutzten Drahtes ändert. Da nun der Querschnitt proportional dem Quadrate des Durchmessers ist, so folgt, dass der Widerstand umgekehrt proportional der vierten Potenz des Durchmessers des benutzten Drahtes sein muss (vergl. auch Anhang A).

Der in der Secunde in einer Wickelung erzeugte Betrag an Wärme ergibt sich aus dem Product des Widerstandes mit dem Quadrate der Stromstärke. Eine in dem Hauptkreise eingeschaltete Wickelung sollte daher nie unnöthig grossen Widerstand besitzen. Es lässt sich leicht erweisen, dass in einer Wickelung von gegebenem Inhalt der Verlust durch Wärme bei derselben magnetisirenden Kraft gleich bleibt, ob nun die Wickelung aus wenigen Windungen eines dicken oder vielen Windungen eines dünnen Drahtes besteht. Der Wärmebetrag in der Secunde ist $= i^2 r$ und die magnetisirende Kraft $= Ni$. Der Widerstand r ändert sich wie das Quadrat von N — der Windungszahl —, sobald das von den Wickelungen eingenommene Volumen gleich bleibt. Denn nehmen wir die doppelte Zahl der Wickelungen und den halben Drahtquerschnitt, so besitzt jedes Meter des dünneren Drahtes den doppelten Widerstand wie vorhin, wir haben aber dann die doppelte Anzahl Meter. Der Widerstand wird also vervierfacht. Der Wärmebetrag ist dann proportional $i^2 N^2$, also proportional dem Quadrate der magnetisirenden Kraft. Wird also mittels der Wickelung die gleiche magnetisirende Kraft ausgeübt, so bleibt der Wärmebetrag bei jeder Wickelung der Spule gleich. Um die Feldmagnete einer Maschine in demselben Grade zu magnetisiren, verbraucht man den gleichen Energiebetrag, mögen die Wickelungen Reihenwickelungen oder Nebenschlusswickelungen sein, wenn nur das Volumen der Wickelungen gleich bleibt.

Man kann sich dies in einfachster Weise klar machen, wenn man sich vorstellt, dass die ganze Wickelung aus nur einer Windung besteht, in welcher ein Strom von soviel Ampere einmal kreist, als die Gesamtzahl der Amperewindungen beträgt. Dieser Strom getheilt durch den Kupferquerschnitt giebt die Stromdichte an. Wir sehen dann, dass bei Wickelungen von gleicher Grösse (die also die gleiche Kupfermenge enthalten) die magnetisirende Wirkung einfach der Stromdichte proportional ist; ferner, dass die auf das Kilogramm Kupfer verbrauchte Arbeit proportional dem Quadrate der Stromdichte ist. Die nachstehende Tabelle giebt den Verlust in Watt bei verschiedenen Stromdichten in Centimetermaass an. Die Temperatur

der Wickelung ist hierbei zu 30 Grad C. angenommen; bei dieser Temperatur kann der Widerstand eines Cubikcentimeters Kupfer zu $1,9 \cdot 10^{-6}$ Ohm gesetzt werden.

Kraftverluste in Kupferleitern bei verschiedenen Stromdichten.

Stromdichte in Ampere auf das Quadratmillimeter	Zahl der in Wärme verwandelten Watt	
	auf das Cubikcentimeter Kupfer	auf das Kilogramm Kupfer
1,5	0,040	4,5
2,0	0,071	8,0
3,0	0,159	17,9
4,0	0,284	31,8
5,0	0,443	49,7
6,0	0,638	71,6

Wird das Volumen der Wickelung (also das Kupfergewicht) vergrößert, so wird der Wärmebetrag verhältnissmässig kleiner. Nimmt man z. B. eine Nebenschlusswicklung mit dem Widerstand r von N Windungen und wickelt N Windungen hinzu, so bleibt die magnetisirende Kraft nahezu gleich, wenn auch die Stromstärke und die Stromdichte infolge der Verdoppelung des Widerstandes auf die Hälfte sinkt; der Wärmeverlust wird nur die Hälfte betragen, denn $2r \cdot (\frac{1}{2}i)^2$ ist $= \frac{1}{2}i^2r$.

Wir nehmen dabei an, dass man bei Anwendung eines Kupferdrahtes von der Hälfte des Querschnittes die doppelte Windungszahl erhält. Dies trifft nicht genau zu, weil die Stärke der isolirenden Schicht bei schwächeren Drähten im Verhältniss zum Durchmesser des Drahtes grösser ist als bei stärkeren Drähten.

Bei dem Entwurf von Dynamomaschinen sollte man sich überdies durch wirthschaftliche Rücksichten leiten lassen und nicht von dem Umstande, dass nur ein bestimmtes Volumen für die Wickelung belassen wird. Falls der Raum um die Kerne herum zur Aufbringung des aus wirthschaftlichen Rücksichten nothwendigen Drahtes ungenügend ist, so sollte man andere Kerne von solchen Abmessungen vorsehen, dass sie den wirthschaftlich besten Draht aufzunehmen im Stande sein werden.

Um den Durchmesser eines für eine Nebenschlusswicklung bestimmten Drahtes zu ermitteln, muss man zunächst die mittlere Länge einer Windung festsetzen. Dies kann mit grosser Genauigkeit

geschehen, wenn der Umfang der Schenkel und die ungefähre Tiefe der Wickelung bekannt sind. Der Durchmesser des Drahtes δ muss so gewählt werden, dass der Widerstand ρ einer Windung dividirt in die Voltzahl der Klemmenspannung die Gesamtzahl der Amperewindungen giebt, also

$$AW = \frac{e}{\rho}.$$

Wenn die Wickelungen kreisförmigen Querschnitt haben und der mittlere Durchmesser = d ist, so muss sein

$$\rho = \frac{\pi d}{\pi \delta^2} \cdot 1,9 \cdot 10^{-6}.$$

Hieraus ergibt sich der Durchmesser des Drahtes in Centimetern zu

$$\delta = \sqrt{\frac{AW \cdot 4d \cdot 1,9}{e \cdot 10^6}}.$$

Beispiel: Wie stark muss ein Kupferdraht für ein Paar Nebenschlusswickelungen von 18930 AW gewählt werden, wenn jede der beiden cylindrischen Rollen einen mittleren Durchmesser von 17 cm hat, und die Klemmenspannung 100 Volt betragen soll (beide Wickelungen in Reihe geschaltet)?

Antwort: 0,156 cm.

Falls keine bestimmte Grenze für das Ansteigen der Temperatur vorgeschrieben wird, so ist für die Auswahl des Drahtes der Energiebetrag maassgebend, der bei der Magnetisirung aufgewendet werden kann. Ist die Grenze für die Temperatur bezeichnet, so muss man proportional der in der Magnetisirungswickelung verbrauchten Energie die Oberfläche zur Abkühlung wählen.

Die Erfahrung lehrt, dass, wenn die Erwärmung 20 bis 25 Grad C. über die Temperatur der Luft nicht hinausgehen soll, mindestens 16 qcm äussere Oberfläche der Wickelung für jedes Watt, das infolge des Widerstandes der Wickelung verbraucht wird, vorhanden sein müssen. Bietet umgekehrt sich nur ein bestimmter Oberflächeninhalt für eine Wickelung, so muss die letztere so ausgewählt werden, dass nur ein Watt auf je 16 qcm Oberfläche entfällt.

Für Nebenschlusswickelungen wird die Länge, daher auch die Masse des Drahtes lediglich durch wirthschaftliche Rücksichten bestimmt. Man verwendet für jedes Volt Spannung in der Regel 23 bis 27 m.

Zulässige Erwärmung und Oberfläche für die Ausstrahlung.

Zur Vermeidung der Ueberhitzung bedarf jede Wickelung einer hinreichenden Oberfläche mit Rücksicht auf den durch den Strom in ihr erzeugten Wärmebetrag.

Die Maschine für Bogenlicht von Brush hat 12,9 qcm Oberfläche für jedes verbrauchte Watt in den Feldmagneten und 5,8 qcm für das Watt im Anker. Beim Anker von Thomson-Houston finden sich 10,7 qcm Oberfläche für jedes Watt. Die Beziehung zwischen der entwickelten Wärme, der ausstrahlenden Oberfläche und der Temperatursteigerung ist von Forbes, Esson und Anderen erforscht worden. Esson findet, dass für Draht, der doppelt mit Baumwolle besponnen und gefirnisst ist, die Wärmeabgabe gleich $\frac{1}{355}$ Watt¹⁾ für 1 qcm und 1 Grad C. ist. Innerhalb des Bereiches der gewöhnlichen Erwärmung darf man annehmen, dass die Wärmeabgabe proportional dem Ueberschuss der Temperatur über die der umgebenden Luft ist.

Die Regel von Esson, die mit der Erfahrung verschiedener Constructeure übereinzustimmen scheint, heisst:

$$\Theta = 355 \frac{w}{s},$$

wenn Θ die Temperatur in Celsius, w die Zahl der Watt, die in Wärme umgesetzt wird, und s die Oberfläche in Quadratcentimetern bedeutet.

Bei Berechnung der Anzahl Watt aus dem Quadrat der Stromstärke und dem Widerstand muss man berücksichtigen, dass der erwärmte Draht einen grösseren Widerstand besitzt als kalter Draht. Hierzu dient folgende Regel: Um aus dem bekannten Widerstand des kalten Drahtes den Widerstand des warmen zu berechnen, addirt man zu dem bekannten Widerstand 1 Procent für je 2,5 Grad C.

Um die höchste zulässige Stromstärke zu finden, wenn die Temperatur Θ vorgeschrieben ist, dient die Formel:

$$\text{Höchste zulässige Stromstärke} = \sqrt{\frac{\Theta \cdot \text{Oberfläche in Quadratcentim.}}{355 \cdot \text{Widerstand (warm)}}}.$$

1) Das Watt ist die Einheit der Leistung = 10 Millionen Erg in der Secunde oder $\frac{1}{736}$ Pferdekraft. Ein durch einen Widerstand von 1 Ohm fließender Strom von 1 Ampere bringt Wärme im Betrage von 1 Watt hervor; da 1 Watt = 0,24 Grammc calorien in der Secunde ist, so heisst das, dass die von 1 Watt in 1 Sec. erzeugte Wärmemenge genügt, um 1 Gramm Wasser um 0,24 Grad C. zu erwärmen.

Beispiel: Eine Rolle hat 2900 qcm Oberfläche und einen Widerstand (warm) von 15 Ohm. Welche Maximal-Stromstärke kann diese Rolle dauernd ertragen, ohne dass ihre Temperatur um mehr als $16\frac{2}{3}$ Grad C. über die der umgebenden Luft steigt?

Antwort: 3 Ampere.

Nimmt man als Sicherheitsgrenze der Temperatur 50 Grad C. über die Temperatur der umgebenden Luft an, so bestimmt sich die höchste Stromstärke für einen gegebenen Elektromagnet durch die Formel:

$$\text{Höchste zulässige Stromstärke} = 0,374 \sqrt{\frac{s}{r}},$$

wenn s die Anzahl der Quadratcentimeter Oberfläche der Wickelungen und r den Widerstand in Ohm bedeutet.

Für eine Nebenschlusswicklung ist:

$$\text{Höchste zulässige Spannung} = 0,374 \sqrt{sr}.$$

Die magnetisirende Kraft eines Nebenschlusses bei gegebener Spannung ist unabhängig von seiner Länge und hängt nur von seiner Stärke ab; je länger der Draht aber ist, desto weniger wird der Verlust durch Wärme betragen. Soll dagegen der Nebenschluss mit gleichbleibender Stromstärke versorgt werden, so ist die magnetisirende Kraft unabhängig von der Drahtstärke und hängt nur von der Länge ab; je stärker der Draht ist, desto geringer ist der Verlust durch Wärme.

Bei umlaufenden Ankern ist die Temperaturerhöhung verhältnissmässig kleiner wegen der Luftcirculation; diese abkühlende Wirkung beim Umlauf ist bei Maschinen, deren Anker fast völlig von den Poloberflächen umgeben sind, natürlich geringer als bei solchen, deren Anker mehr freiliegen. Man hat ermittelt, dass beim Anhalten einer Maschine nach längerem Umlauf die Temperatur der Oberfläche sogleich über die während des Betriebes herrschende steigt, indem die von den wärmeren Innentheilen nach Aussen abgeführte Wärme dann nicht so schnell abgegeben werden kann. In den »Admiralty Specifications« wird bestimmt, dass eine Maschine am Ende einer Betriebszeit von 6 Stunden und 1 Minute nach dem Anhalten in keinem Theile eine grössere Temperatursteigerung über die Temperatur der umgebenden Luft als $16\frac{2}{3}$ Grad C. zeigen soll. Dies ist aussergewöhnlich wenig, da eine zwei bis dreimal so grosse Steigerung bei gewöhnlichem Betrieb in einem Maschinenraum noch vollkommen unbedenklich bleibt. Kapp lässt 9,7 qcm für jedes im Anker verbrauchte Watt zu und 16,2 qcm für jedes Watt im Feldmagnet.

Esson findet in Ankern bei den gebräuchlichen Geschwindigkeiten eine Zunahme von 35 Grad C., wenn für jedes Watt 7,3 qcm vorhanden sind. Die vorhin gegebene Formel für Feldmagnete würde bei derselben Steigerung eine geringste Oberfläche von 9,7 qcm für das Watt ergeben. Esson giebt für verschiedene Geschwindigkeiten die Näherungsformel

$$\Theta = \frac{354,84 w}{s(1 + 0,0005245 v)},$$

wenn w die Anzahl der Watt, s die Oberfläche in Quadratcentimetern, und v die Umfangsgeschwindigkeit in Metern für die Secunde bedeutet.

Nach A. H. und C. E. Timmermann¹⁾ scheint die Zahl der Watt, welche auf das Quadratcentimeter und den Grad (Cels.) Temperaturerhöhung ausgestrahlt werden können, mit wachsender Umfangsgeschwindigkeit zuzunehmen; sie wächst danach von 0,00155 bei der Geschwindigkeit 0 auf 0,0028 bei 300 m in der Minute und 0,0034 bei 900 m in der Minute. Bei einer Temperaturerhöhung von 30 Grad C. ist die Zahl der Quadratcentimeter Ausstrahlungsfläche für 1 Watt gleich 21,3 bei der Geschwindigkeit 0, 12,3 bei 300 m und 9,7 bei 900 m Geschwindigkeit in der Minute.

Berechnungen über höhere Erwärmung der inneren Lagen sind von Joyce²⁾ angestellt worden.

Die nachstehenden Regeln sind zweckmässig, wenn es sich um Berechnung der Wickelungen für Maschinen desselben Musters, aber von verschiedener Grösse oder Leistung handelt.

Um die gleiche Grenztemperatur mit gleich grossen Wickelungen, die aber mit verschieden starkem Draht bewickelt sind, zu erhalten, muss der Querschnitt des Drahtes im Verhältniss zur Stromstärke sich ändern, d. h. die Stromdichte (Ampere für 1 qmm) muss gleich bleiben.

Um zwei gleich geformte Wickelungen, die nur in der Grösse verschieden sind, und in denen die Drahtstärken sich wie die Abmessungen der Wickelungswärme verhalten (d. h. die grosse Spule muss so viele Windungen enthalten als die kleine), auf dieselbe Temperatur zu bringen, ist es erforderlich, dass die Quadrate der Stromstärken sich wie die dritten Potenzen der linearen Abmessungen verhalten. Aehnliche Eisenkerne, die mit Drahtlängen, die den Quadraten der linearen Abmessungen proportional sind, bewickelt werden, bringen bei der Erregung mit gleichen Strömen an ähnlich belegenen Punkten gleiche magnetische Kräfte hervor (Lord Kelvin, Phil. Trans. 1856, Seite 287).

1) Trans. Amer. Inst. Electr. Engin., Bd. 10. 1893.

2) Journ. Inst. Electr. Engin., Bd. 19, S. 248. 1890.

Bei Maschinen gleicher Gattung muss die Zahl der Amperewindungen proportional den linearen Abmessungen sein, wenn sie bis zu dem gleichen Sättigungsgrade magnetisirt werden sollen.

Sollen zwei Maschinen die gleiche elektromotorische Kraft liefern, so muss der Drahtdurchmesser der Wickelungen sich wie die linearen Abmessungen ändern.

Wenn bei der Aenderung der Feldmagnete einer Maschine von gegebener Leistungsfähigkeit die Längen der verschiedenen Theile des magnetischen Kreises gleich bleiben, aber die verschiedenen Flächen geändert werden, so muss der Querschnitt des Drahtes für die neue Wickelung proportional zum Umfange des Querschnittes der Kerne sich ändern. Der Widerstand einer Wickelung von bekanntem Volumen, die mit rundem Kupferdraht von d mm Durchmesser bewickelt und durch die Isolirhülle auf den Durchmesser D gebracht worden ist, lässt sich nach folgender Regel berechnen. Dieselbe gründet sich auf die Annahme, dass bei theilweise eingelegten Windungen 10 Procent Draht mehr aufgebracht werden kann, als der Fall sein würde, wenn die Windungen genau aufeinander passend gewickelt werden. Dies trifft nur annähernd zu, da der durch Einlegung entstehende Mehrbetrag mit der Stärke und Geschmeidigkeit des isolirenden Ueberzuges sich etwas ändert, ebenso auch mit der Drahtsorte.

Ist v die Masse in Cubikcentimetern, r der Widerstand des Drahtes in kaltem Zustande, so wird

$$r = 0,0244 \frac{v}{D^2 d^2}.$$

Länge und Durchmesser von Ankern.

Zur Bestimmung des Verhältnisses zwischen der Länge und dem Durchmesser eines Ankers hat man verschiedene Regeln aus den Ergebnissen der Praxis aufgestellt.

Für zweipolige Dynamomaschinen schwanken die gewöhnlichen Abmessungen der Ringanker von $L = \frac{1}{2}d$ bis $L = 1,5d$; $L = d$ kommt häufig vor. Die Werthe beziehen sich auf den unbewickelten Kern. Bei Trommelankern ist häufig $L = 2d$, ebensowohl findet man auch $L = 1,5d$ und $L = 3d$. Bei den Edison'schen zweipoligen Maschinen wechselt L zwischen 1,85 bis 1,9 d bei den Grössen von 1 bis 50 Kilowatt. Bei vielpoligen Maschinen ist der Durchmesser gewöhnlich grösser als die Länge. Bei Brown's sechspoligem Trommelanker (Tafel VII) ist d nahezu gleich $2L$.

Querschnitt der Feldmagnete.

Der Vergleich von Maschinen aus verschiedenen Fabriken zeigt, dass bei Ringmaschinen die Magnetkerne in der Regel einen 1,66 mal so grossen Querschnitt besitzen als der Ankerkern, falls Schmiedeeisen oder Stahlformguss angewendet wird; besteht der Magnetkern aus Gusseisen, so ist der Querschnitt dreimal so gross. Für Magnetkerne in Trommelmaschinen stellen sich die Verhältnisszahlen auf 1,25 und 2,3.

Häufig wird die Frage aufgeworfen, welche Querschnittsform man den Magnetkernen am zweckmässigsten zu geben hat. Diese Frage ist leicht zu lösen, wenn man die geometrische Thatsache berücksichtigt, dass von allen möglichen Formen, die eine gleiche Fläche einschliessen, der Kreis den geringsten Umfang besitzt. Zur Erleichterung der Vergleichung zeigt die nachstehende Tabelle die verhältnissmässigen Längen des Drahtes, die zur Bewickelung verschiedener Formen von gleicher Querschnittsfläche nothwendig sind; die Länge des bei einfacher Kreisform erforderlichen Drahtes ist dabei als Einheit angenommen.

Kreis	1,
Quadrat	1,13,
Rechteck 2 : 1	1,20,
Rechteck 3 : 1	1,30,
Rechteck 16 : 1	1,98,
Oval aus einem Quadrat zwischen zwei Halbkreisen	1,09,
Oval aus zwei Quadraten zwischen zwei Halbkreisen .	1,21,
Zwei Kreise nebeneinander	1,41,
Zwei Kreise, zusammen bewickelt	1,16,
Drei Kreise, jeder für sich bewickelt	1,73,
Vier Kreise, jeder für sich bewickelt	2,00.

Symmetrie der Feldmagnete.

Auf Seite 156 war ausgeführt worden, dass bei zweipoligen Feldmagneten in einfachem Kreise das Feld nicht symmetrisch, sondern viel stärker zwischen den inneren Kanten als zwischen den äusseren Kanten der Polstücke ist, sobald die Polstücke wie in der Figur 101, Nr. 23 geformt sind. Hierdurch entstehen schädliche Wirkungen. Zunächst wird der Anker nach abwärts gezogen; ferner wird ein Ringanker elektrisch nicht abgeglichen sein, weil das ungleiche Feld an den entgegengesetzten Enden des Durchmessers dies verhindert;

endlich liegen die neutralen Punkte, an denen eine Funkenbildung ausbleibt, nicht an entgegengesetzten Enden eines Durchmessers.

Wirkung der Verbreiterung des Zwischenraumes.

Eine Erweiterung des Zwischenraumes verursacht in jedem Falle die Aufwendung eines grösseren Energiebetrages zur Erhaltung des magnetischen Feldes in dem Zwischenraum, mit andern Worten: Auf dem Feldmagnet wird eine grössere Zahl von Amperewindungen erforderlich. Es entstehen auch noch andere Folgen. Der Zer-

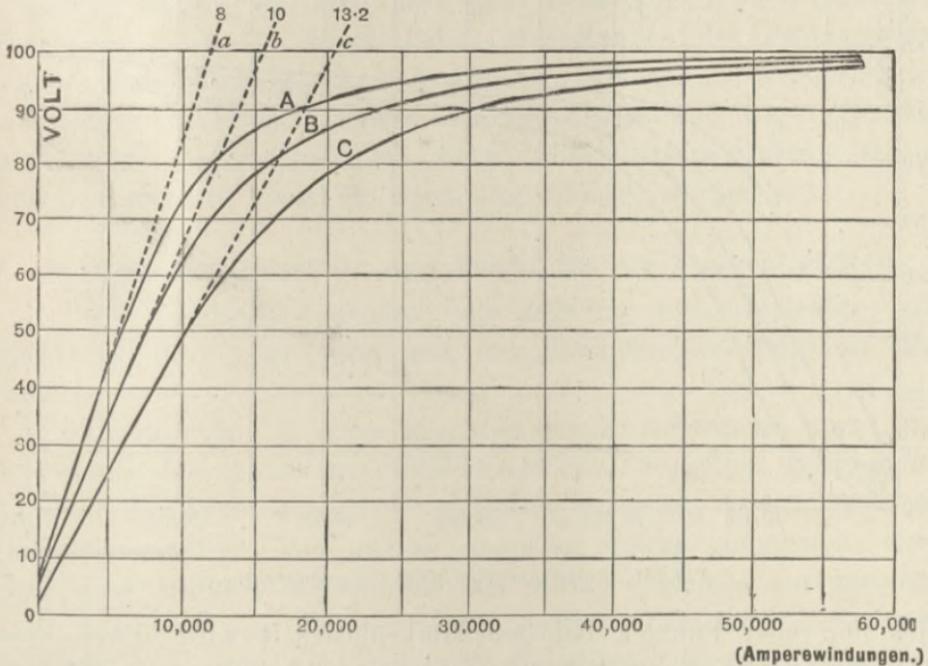


Fig. 260. Darstellung der erforderlichen Erregung bei verschiedenen Zwischenräumen.

streuungskoeffizient v wird etwas vergrössert. Es wird dagegen möglich, mehr Kupfer oder stärkere Leiter auf den Anker zu bringen und dadurch den inneren Widerstand zu ermässigen. Wenn der Anker nicht über die Grenze, welche Funkenlosigkeit sichert, hinaus belastet worden ist, steigt die Leistung der Maschine. Ferner ist es nicht ohne Bedeutung, dass der Widerstand in dem Wege der quermagnetisirenden magnetomotorischen Kräfte anwächst und deren schädliche Wirkung vermindert. Aus den von Arnoux mitgetheilten charakteristischen Curven (Fig. 260) kann man die zuerst genannte Wirkung erkennen. Sie zeigen das Ergebniss der Verbreiterung des Zwischenraumes von 8 auf 10 und dann auf 13,2 mm. Die anfängliche Steigung der Charakteristik wird durch Linien bezeichnet,

deren Tangenten umgekehrt proportional dem Maasse des Zwischenraumes sind. In den oberen Theilen nähern sich die drei Linien einander.

Interferenz des Ankerfeldes.

Wie im Kapitel IV (S. 68) erläutert worden ist, äussert der Strom im Anker eine quermagnetisirende Wirkung. Wenn die Bürsten vorwärts geschoben sind (in einer Triebmaschine rückwärts), so sucht der Strom auch das Feld zu entmagnetisiren. Die Lage

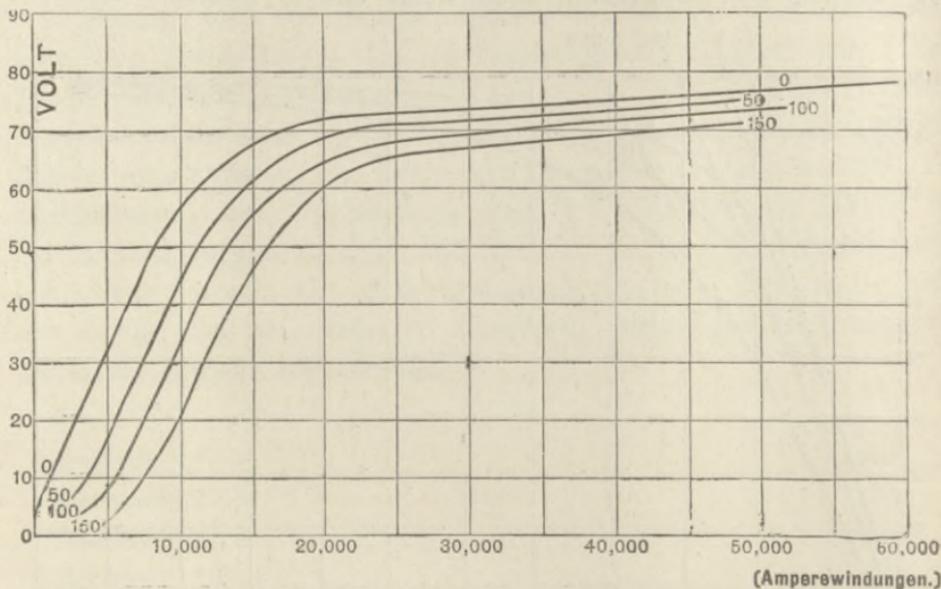


Fig. 261. Belastungslinien einer Dynamomaschine.

des neutralen Punktes bei der Funkenlosigkeit wird durch diese Interferenz beeinflusst (S. 77); es wurde auch gezeigt, wie die entmagnetisirende Wirkung auszugleichen ist (S. 330).

Zunächst soll nun das Verhalten einer gegebenen Maschine geprüft werden, und zwar durch Betrachtung der Beziehung zwischen der Spannung und dem Betrage der Erregung, wenn irgend eine gleichbleibende Geschwindigkeit herrscht, aber die Bedingungen der Belastung sich ändern. Den Bürsten möge eine solche Stellung ertheilt werden, dass Funkenlosigkeit eintritt. Die erste Curve werde erhalten, wenn im Anker kein Strom herrscht, die zweite bei 50, die dritte bei 100 Ampere u. s. w. Die Versuche mögen in jedem Falle bei der höchsten Erregung (und dem kleinsten Verschiebungswinkel) beginnen, dann werde die Erregung allmählich vermindert (die Verschiebung der Bürsten vergrössert), bis eine Stellung für die Funkenlosigkeit nicht mehr zu ermitteln ist. Die

Versuchsmaschine¹⁾, welche die Curven der Figur 261 lieferte, war für eine Regelleistung von 150 Ampere bei 70 Volt bestimmt.

In jedem Falle findet man, dass, je geringer die Belastung ist, desto mehr die Erregung des Feldes vermindert werden kann, ehe der Zustand eintritt, dass ein neutraler Punkt nicht mehr zu ermitteln ist. Mit andern Worten: Es besteht immer eine bestimmte Beziehung zwischen den Amperewindungen des Ankers und denen des Feldmagnetes, wodurch die Grenze der Funkenlosigkeit festgestellt wird. Wir werden diese Beziehung gleich untersuchen. Vorläufig ist zu bemerken, dass diese Belastungscurven²⁾ eine gute Belehrung über die erforderlichen Wickelungen des Feldmagnetes geben, ferner darüber, wie viele Amperewindungen die Nebenschlusswicklung bei offenem Kreise beitragen muss und wie viele ausgleichende Amperewindungen durch die Reihenwicklung hinzukommen müssen, wenn die Spannung erhalten werden soll.

Grenzen der Belastung und Punkt für die Funkenlosigkeit.

Zwei Umstände begrenzen die Leistung einer Maschine: die Erhitzung der Ankerleiter und die Funkenentwicklung an den Bürsten.

Erweitern wir in einer Maschine den Zwischenraum etwas und bewickeln den Anker mit Kupferdraht von doppeltem Querschnitt, so wird der Widerstand auf die Hälfte ermässigt, und wir können dann einen Strom von nahezu doppelter Stärke entnehmen, ohne dass eine stärkere Erwärmung als vorher einträte, vorausgesetzt aber, dass noch keine Funkenbildung beginnt. Eine solche umgebaute Maschine von doppelter Leistung würde offenbar weniger kosten, als zwei Maschinen des ursprünglichen Musters. Die Grenze für die Erhöhung der Leistung durch Vermehrung der Amperewindungen des Ankers wird indessen sehr bald erreicht, denn die Neigung zum Quermagnetisiren wird doppelt so stark, die Bürstenverschiebung wird grösser, und die entmagnetisirende Wirkung wird durch Verdoppelung der Amperewindungen des Ankers mehr als doppelt so gross.

Diese störenden Wirkungen kann man sämmtlich unter der Bezeichnung »Interferenz« (vergleiche die Ueberschrift Seite 356) zusammenfassen. Sie sind mehr oder minder eingehend von

1) Vergl. Arnoux in Bull. de la Soc. Int. des Electric., Bd. 6, S. 61. 1889.

2) Andere Beispiele sind von Esson in dem Journal Instit. Electr. Engin., Bd. 19, S. 152, 1890 und von Kapp in den Proceed. Instit. Civil Engin., Februar 1889, angeführt worden.

Hopkinson¹⁾ erforscht worden, vollständiger von Swinburne²⁾ und von Esson³⁾.

Da die einzelnen Abtheilungen der Ankerwicklung Selbstinduction besitzen, so erfordert die Umkehrung des Stromes bei dem Vorgange der Stromwendung während des Vorbeilaufens an den Bürsten eine elektromotorische Kraft; diese wird herbeigeführt, indem man den Bürsten eine Verschiebung ertheilt (beim Stromerzeuger nach vorwärts, bei der Triebmaschine nach rückwärts), so dass diejenige Abtheilung, in der der Strom umgekehrt werden soll, zu der betreffenden Zeit durch den schwachen Theil des magnetischen Feldes geht. Je stärker der umzukehrende Strom ist, desto stärker muss das Feld für die funkenlose Umkehrung sein.

Das Feld unterhalb der einen Polkante, in deren Nähe die Stromwendung vor sich geht, wird durch die Interferenz des Ankers geschwächt (Fig. 62 und 66). Infolge der quermagnetisirenden Wirkung des Ankers ist letzterer bestrebt, von beiden Seiten des Kernes Kraftlinien zu entsenden, von denen die Zwischenräume durchdrungen werden und die durch die Polstücke hindurch zum Anker zurückkehren; die stärkste quermagnetisirende Wirkung in den Zwischenräumen äussert sich unterhalb der Kanten der Polstücke. Diese Quermagnetisirung wirkt der normalen magnetischen Strömung an der Spitze rechts und unten links bei den Polkanten entgegen, während sie an den beiden anderen Kanten unterstützend wirkt (Fig. 63). Die querwirkende magnetomotorische Kraft unterhalb der Polkanten ist (unter der Annahme, dass die Luftzwischenräume allein einen merklichen Widerstand bieten) gleich $\frac{4}{15} \pi$ mal den Amperewindungen sämtlicher Leiter, die in den Zwischenräumen oder in dem von den Polflächen überspannten Winkel ψ liegen. Die gesammten Amperewindungen auf dem Anker sind $= \frac{1}{2} N \cdot \frac{1}{2} i_a$; von diesen liefern $\frac{\psi}{180}$ die querwirkende magnetisirende Kraft. Die Hälfte kann als der wirksame Theil an der Stelle angenommen werden, wo der querliegende Kreis einen Zwischenraum kreuzt.

1) Philos. Transact., 1886, Theil I, Seite 331 und Electrician, Bd. 18, Dezember 1886.

2) Journ. Instit. Electric. Engin., Bd 15, S. 540, 1886 und Bd. 19, S. 90 und 265. 1890.

3) Ebenda, Bd. 19, S. 118. 1890; Bd. 20, S. 265. 1891. Auch Electr. World, Bd. 15, S. 213. 1890. Vergl. auch Electr. Rev. 1890: Reihe von Artikeln über Studium der Dynamomaschinen.

Wird ϕ zu 120 Grad angenommen, so ist die querwirkende Kraft unterhalb der Polspitze:

$$\frac{1}{2} N \cdot \frac{1}{2} i_a \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{4}{10} \pi \cdot \frac{120}{360} = 0,104 N i_a$$

oder gleich den Amperewindungen¹⁾ auf dem Anker multiplicirt mit $4 \cdot 0,104 = 0,416$.

Wir wollen nun ermitteln, welche Zahl von Amperewindungen des Ankers eine querwirkende Kraft in dem Zwischenraum hervorbringen würde, die zur Ausgleichung der normalen magnetisirenden Kraft dort genau ausreichte, so dass das Feld unter der Polspitze neutralisirt wäre. In diesem Falle wäre eine Umkehrung ohne Funkenbildung unmöglich, und damit würde die Belastungsgrenze bestimmt sein.

Die magnetische Potentialdifferenz in den Zwischenräumen ist gleich dem Produkt des magnetischen Widerstandes des Zwischenraumes mit der den Raum durchsetzenden Strömung.

Bedeutet l_2 die Breite des Zwischenraumes und A_2 die Polfläche, so beträgt der Widerstand $\frac{l_2}{A_2}$ und die magnetische Potentialdifferenz

ist $= \mathfrak{S} \frac{l_2}{A_2}$. Es sei nun die der Achse parallele Länge des Ankers oder der Polfläche $= L$, die Ausdehnung des Poles längs der Krümmung von Spitze zu Spitze $= b$, die radiale Tiefe des Kernes $= r$ und die Querschnittsfläche des Kernes A_1 .

Wir wollen annehmen, dass im Kern die Magnetisirung $\mathfrak{B} = 17000$ beträgt. Dann gilt folgende Beziehung:

$$\mathfrak{S} = 17000 A_1; A_1 = r L; A_2 = b L.$$

1) Dieser Ausdruck ist hier in demselben Sinne wie für jeden Elektromagnet gebraucht worden. In zweipoligen Trommelankern kommt der halbe Strom im Anker, multiplicirt mit der Hälfte der äusseren Leiter, in Frage. In vielpoligen Maschinen (mit paralleler Gruppierung der Leiter) ist der Werth gleich der gesamten Stromstärke multiplicirt mit der gesamten Zahl der Leiter und dividirt durch das Quadrat der Polzahl. In der Abhandlung von Esson (Journal Instit. Electric Engin., Bd. 19, S. 143. 1890) wird der Ausdruck Amperewindungen in einer abweichenden Bedeutung gebraucht, und zwar als das Product der gesamten Zahl der Leiter mit der Stromstärke in jedem. In seiner Abhandlung vom Jahre 1891 (Journ. Instit. Engin., Bd. 20, S. 266) gab Esson diesem Werthe die Bezeichnung „volume“; besser wäre die Bezeichnung als gesamter Umlauf des Ankerstromes. Der in diesem Werke für die genannte Grösse gebrauchte Ausdruck ist „Umfluss“ (Circumflux). In zweipoligen Maschinen ist der Umfluss gleich den doppelten Amperewindungen, in vierpoligen gleich den vierfachen Amperewindungen u. s. w.

Setzen wir diese Werthe in die Gleichung

$$\text{Potentialdifferenz} = \mathfrak{S} \frac{l_2}{A_2}$$

ein, so folgt:

$$\text{Magnetische Potentialdifferenz im Zwischenraum} = 17\,000 \frac{r l_2}{b}.$$

Setzen wir diesen Werth gleich dem der quer wirkenden Kraft $0,104 N i_a$, so folgt:

$$\frac{N i_a}{4} = 40\,900 \frac{r l_2}{b}.$$

Für verschiedene Zwecke, besonders wenn vielpolige Maschinen in Frage kommen, ist es bequem, nicht die Amperewindungen des Ankers, sondern den wirklichen Stromfluss zu betrachten, indem man die Zahl der Ankerleiter und die in den Leitern herrschende Stromstärke ohne Rücksicht auf die Richtung miteinander multiplicirt. Diese durch den Buchstaben Q bezeichnete Grösse wollen wir den »Umfluss« (Circumflux¹) des Stromes nennen.

Er ist gleich dem Product der ganzen Stromstärke im Anker mit der Gesamtzahl der Ankerleiter, dividirt durch die Zahl der Pole.

Für eine zweipolige Maschine finden wir als Grenzbelastung des Ankers:

$$Q = \frac{N i_a}{2} = \frac{81\,800 r l_2}{b}.$$

Esson²) führt die Ergebnisse seiner Beobachtungen an einer Anzahl neuerer Maschinen aus verschiedenen Fabriken an. Er hat gefunden, dass der Zahlencoëfficient bei Maschinen mit Ringankern von 61265 bis 95905 sich ändert, im Mittel 85000 beträgt, somit wenig von der in der Formel angegebenen Zahl abweicht.

Aus dem Angeführten geht hervor, dass die höchste zulässige Belastung für einen Anker innerhalb der Grenze für die Funkenlosigkeit gerade proportional der radialen Tiefe des Kernes und der Länge des Zwischenraumes ist, aber umgekehrt proportional zu der Länge der polaren Krümmung (b).

Wenn wir deshalb für eine Maschine, deren Belastung sich noch eben innerhalb der Grenze der Funkenlosigkeit befindet, eine stärkere Belastung wünschen (oder mehr Kupfer auf den Anker), so können wir dies entweder durch eine grössere radiale Tiefe der

1) Esson bezeichnet dies einmal als »Amperewindungen«, ein anderes Mal als »Volumen« des Ankerstromes. Vergl. auch die vorige Anmerkung.

2) Journ. Instit. Electr. Engin., Bd. 20, S. 142. 1890.

Kernscheiben erreichen oder durch Vergrößerung des Zwischenraumes (der dann für Kupfer oder als Spielraum benutzt wird), oder endlich, indem wir die Abmessung der polaren Ausdehnung (b) vermindern.

Das erste Mittel bedingt einen neuen Anker, das zweite eine neue Ausbohrung der Polflächen und eine (nicht bedeutende) Erhöhung der magnetisirenden Kraft im Feldmagnet; das dritte Mittel bewirkt die Concentrirung der Kraftlinienmenge, wobei die Durchlässigkeit etwas ermässigt wird, und erfordert entweder eine etwas höhere Geschwindigkeit oder eine kleine Zunahme der magnetisirenden Kraft. Der für einen Anker von gegebenem Durchmesser zulässige Umfluss des Stromes lässt sich (für zweipolige Ringanker) durch den Durchmesser in der Voraussetzung ausdrücken, dass $b = 1,05 d$; $r = 0,1 d$ und $l_1 = 0,05 d$ ist.

Dann wird

$$Q = 390 d.$$

Esson nimmt für Ringanker als Grenzwert von Q $400 d$ (d in Centimetern), für Trommelanker $600 d$ an. Kapp lässt 1000 Amperewindungen (d. h. 2000 Umfluss bei zweipoligen Maschinen) für je 2,5 cm über 30,5 cm Durchmesser als Belastung zu.

Wir wollen nunmehr die Leistung (in Watt) einer Maschine, ausgedrückt durch ihre Abmessungen, erörtern.

Die gesammte Leistung einer zweipoligen Maschine ist:

$$W = E i_a = \frac{n N \mathfrak{S} i_a}{10^8} \text{ (vergl. Ia, Seite 160)}$$

und die Leistung einer vielpoligen Maschine:

$$W = n N \frac{\mathfrak{S} i_a}{p \cdot 10^8},$$

wenn p die Zahl der Polpaare bedeutet.

Der Werth des Umflusses Q des Ankerstromes ist $= \frac{N i_a}{2 p}$, demnach:

$$W = 2 n \mathfrak{S} \frac{Q}{10^8} \dots \dots \dots (a).$$

Es werde (als mittlerer Durchschnitt für die Praxis) angenommen, dass die Polstücke zusammen $\frac{7}{10}$ des Umfanges (oder $2,2 d$) bedecken und dass der Werth von \mathfrak{B} in dem Zwischenraum 5000 beträgt. Wenn L die Länge des Ankerkernes in Centimetern bedeutet, so ist die wirksame Ankerfläche, durch welche magnetische Linien ein- oder austreten, gleich $2,2 d L$; die Fläche eines jeden polaren Theiles ist sonach $\frac{2,2 d L}{2 p}$, und die Kraftlinienmenge durch jeden

Pol wird 5000 mal so gross sein. Für die gesammte Kraftlinienmenge durch $2p$ Pole erhält man dann:

$$\mathcal{E} = p \cdot 5000 \cdot \frac{2,2 d \cdot L}{2p} = 5500 d \cdot L.$$

Nach Einsetzung des Werthes \mathcal{E} (in Gleichung α) erhält man:

$$W = \frac{11000 d \cdot L \cdot n \cdot Q}{10^8} \dots \dots \dots (\beta).$$

Nach Esson beträgt, wie vorhin angeführt, die zulässige Belastung bei Ringankern $Q = 400 d$, bei Trommelankern $Q = 600 d$. Unter Berücksichtigung dieser Werthe folgt¹⁾:

$$\left. \begin{array}{l} \text{für Ringanker} \dots \dots W = 0,044 d^2 L n \\ \text{» Trommelanker} \dots \dots W = 0,066 d^2 L n \end{array} \right\} \dots \dots (\gamma).$$

Nun ist $d^2 L$ proportional dem Volumen des Ankerkernes. Daraus folgt, dass die Leistung proportional diesem Volumen und der Geschwindigkeit ist und unabhängig von der Zahl der Pole und der Gruppierung der Ankerleiter. Kapp findet die Leistung (für gleiche Oberflächentemperatur) anwachsend wie die 3,5fache Potenz des Durchmessers. Dies stellt sich etwas höher als das Verhältniss zum Volumen, wahrscheinlich aus dem Umstande, weil mit grossen Ankern etwas grössere Umfangsgeschwindigkeiten erreicht werden.

Anordnungen zur Ausgleichung der Gegenwirkung des Ankers.

Da die Leistung einer Dynamomaschine sowohl von der Erwärmung als auch ganz besonders von der Funkenbildung abhängt, so ist bei dem Entwurf besonders Bedacht zu nehmen, letztere zu verhindern. In vielen Fällen kann eine Dynamomaschine oder ein Motor wenige Minuten hindurch auf das Doppelte seiner normalen Leistung beansprucht werden; doppelte Leistung bedeutet aber vierfache Erhitzung, welche, wenn nur kurze Zeit wirkend, unschädlich sein kann; wenn dagegen ebenso lange Funkenbildung am Stromwandler auftritt, kann der Schaden recht erheblich sein. Es ist daher wichtig, Maschinen so zu entwerfen, dass selbst bei doppelter Belastung keine erhebliche Funkenbildung eintritt. Wir sahen, dass die Grenze, bei welcher Funkenbildung beginnt, abhängig ist von der Gegenwirkung des Ankers, die das Feld in der Umgebung der

1) Esson erhält bei etwas grösserer Abmessung der Polstücke 0,048 und 0,072 als Coëfficienten. Snell (Journ. Inst. Electr. Engin., Bd. 20, S. 197) findet die Coëfficienten seiner Maschine zu 0,0375 und 0,056.

Polspitzen schwächt, was zur Erreichung einer funkenlosen Stromwendung nothwendig ist.

Betrachten wir zunächst die Theorie der Ankerstörungen¹⁾. Ziehen wir eine geschlossene Curve $ABCA$ längs des magnetischen Kreises, die also durch die Magnetisierungsrollen geht (Fig. 262), so ist das Linienintegral der magnetisirenden Kräfte dieser Linie entlang gleich $0,4\pi$ mal der Zahl der Amperewindungen in den Rollen. Eine gleiche magnetomotorische Kraft wird um die geschlossene Curve $DEFD$ sein, obwohl die Kraftlinienmenge auf diesem Wege wegen des grösseren Widerstandes geringer ist. In ähnlicher Weise wird, wenn die Bürsten um einen Winkel λ vorgeschoben werden, die Zahl der Leiter in der entmagnetisirenden Zone (vergl. Seite 81)

ein Bruchtheil $\frac{2\lambda}{\pi}$ der Gesamtzahl der Leiter N auf dem Anker sein, und da jeder Leiter den halben Strom führt, ist (für Trommelwickelungen) die Zahl der entmagnetisirenden Amperewindungen

$$\frac{\frac{1}{2}i_a \cdot \frac{1}{2}N \cdot 2\lambda}{\pi} = \frac{\lambda i_a N}{2\pi},$$

und die entmagnetisirende magnetomotorische Kraft gleich $0,2\lambda i_a N$. Ferner kann die Neigung zur Quermagnetisirung berechnet werden, indem wir eine durch die Spitzen eines Polstückes gezogene geschlossene Curve $HAGDH$ betrachten.

Nennen wir den Polwinkel ψ , so ist die Zahl der von dieser Curve eingeschlossenen Leiter $= \frac{\psi N}{2\pi}$, und das Linienintegral der quer-

magnetisirenden Kräfte $= \frac{0,4\pi \cdot \frac{1}{2}i_a \cdot \psi N}{2\pi} = 0,1\psi i_a N$. Da der

Widerstand dieses Weges, soweit er im Eisen liegt, gegenüber dem der beiden Luftzwischenräume A und D vernachlässigbar gering ist, so können wir den obigen Betrag als allein auf A und D entfallend betrachten; die magnetische Potentialdifferenz wird also bei A um die Hälfte dieses Betrages vermindert, bei D um ebensoviel vermehrt. Da irgend eine kleinere geschlossene Curve, z. B. ad eine

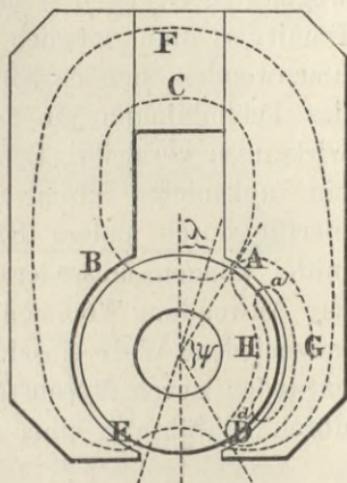


Fig. 262. Ankerstörungen.

1) J. und E. Hopkinson, Phil. Trans. 1886; auch in Hopkinson's Original Papers 1893, S. 105.

geringere Zahl von Leitern einschliesst, wird dort eine entsprechend geringere störende Wirkung hervorgebracht. Das Feldminimum, welches wegen der Stromwendung zwischen den Polspitzen erforderlich ist, hängt ab von der Stärke des zu wendenden Stromes, der hierzu vorhandenen Zeit und von der Selbstinduction der Abtheilung. Die Querkraft, welche das Feld in der Gegend um A zu vermindern strebt, darf dasselbe aber nicht bis unter das nothwendige Minimum schwächen. Wir müssen uns erinnern, dass die entmagnetisirende Gegenwirkung (welche proportional λ ist) das Feld im Allgemeinen zu schwächen sucht, während die quermagnetisirende Gegenwirkung (welche proportional ϕ ist) das Feld unter den mit der Bewegung verlaufenden Polspitzen zu schwächen, unter den gegen die Bewegung gerichteten Polspitzen dagegen zu stärken bestrebt ist. Damit es nun möglich ist, auch sehr starke Ströme funkenlos umzuwenden, müssen wir das Feld so stark machen, dass wenigstens das Feldminimum an den Polspitzen trotz dieser beiden Gegenwirkungen verbleibt. Sehen wir dann, dass das Querfeld doch noch ein funkenloses Stromwenden schwierig macht, bleibt nur übrig, hierfür durch andere Hilfsmittel Abhilfe zu suchen. Diese Hilfsmittel können entweder bei den Feldmagneten oder beim Anker zur Anwendung kommen. Im ersten Falle können wir noch zwei verschiedene Wege einschlagen; wir können das Querfeld beeinflussen entweder durch Vermehrung des magnetischen Widerstandes oder durch Einführung einer compensirenden magnetomotorischen Kraft.

Vermehrung des magnetischen Widerstandes.

Jeder in den geschlossenen Weg $HAGDH$ des Querfeldes eingefügte Luftzwischenraum wird dasselbe schwächen; daher würde schon eine Erweiterung des Zwischenraumes zwischen Ankerwicklung und Polfläche bis zu einem gewissen Grade helfen, aber dann müssen mehr Windungen auf den Feldmagneten angebracht werden. Ferner kann man die Eisenmasse der Pole hinter den Stirnflächen durch eine V -förmige Vertiefung nahezu theilen und damit die quer verlaufende Strömung der magnetischen Linien schwächen; bei den Magneten der Manchestertype (Nr. 24, Fig. 101) und bei ähnlichen Formen mit doppelten magnetischen Kreisen (wie Nr. 8, Fig. 100 und Fig. 109) ist das durch eine in verständigen Grenzen gehaltene Verminderung der Stärke, oder, wie in Nr. 27, Fig. 101, durch gänzliche Trennung der rechts und links liegenden Theile der Pole geschehen. Um eine Schwächung der Construction in mechanischer

Hinsicht zu vermeiden, ist häufig, wie in Figur 263, eine dünne Rippe im Guss zur Verstärkung angeordnet. Noch eine andere Methode, die vom Verfasser vor einigen Jahren angegeben wurde, besteht darin, die Feldmagnete aus Eisenstücken mit Längszwischenräumen aufzubauen, wie in Figur 264 dargestellt.

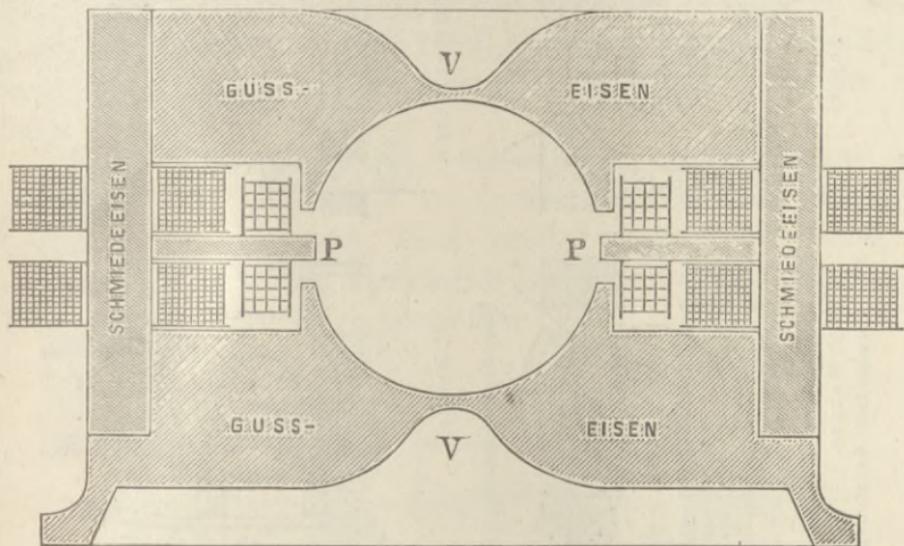


Fig. 263. Feldmagnet mit V-förmigen Zwischenräumen und Ausgleichspolen.

Anbringung einer besonderen Wickelung.

Elihu Thomson schlug vor, eine Wickelung auf einem besonderen, den Anker umgebenden Rahmen aufzubringen und sie in einer gegen die Umdrehungsrichtung schräg liegenden Richtung zu neigen, damit sie theilweise dem Querfelde entgegenwirkte. Swinburne¹⁾ rieth, eine kleine (in Reihe geschaltete) Hilfswickelung auf die Polspitzen zu bringen, wie in Figur 265 a dargestellt, welche an dieser Stelle ein entgegengerichtetes Feld erzeugen sollte. Mather²⁾, Housman³⁾ und Swinburne⁴⁾ befürworteten auch die Verwendung von Hilfspolen, welche, rechtwinklig zu den Hauptpolen gerichtet und mit Hauptkreiswicklung versehen, der

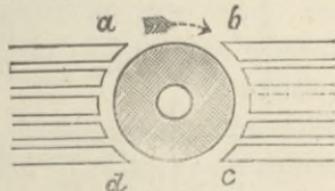


Fig. 264.

1) Journ. Soc. Electr. Eng., Bd. 15, S. 542. 1886.

2) La Lumière Electrique, Bd. 19, S. 404. 1885.

3) Journ. Inst. El. Eng., Bd. 20, S. 299. 1891.

4) Vergl. Swinburne (Journ. Inst. El. Eng., Bd. 30, S. 105. 1890); und Housman (ebenda Bd. 20, S. 299. 1891), welcher behauptet, dass, wenn $\mathfrak{B} = 7000$ unter dem Polstück, das Hilfsfeld wenigstens gleich 3000 sein muss.

Ankerkraft entgegenwirken sollten (Fig. 263). Verfasser dieses Buches schlug eine zusammengesetzte Wickelung vor, bei der Hauptkreis- und Nebenschlusspole unter spitzen Winkeln angeordnet waren (Fig. 265 c),

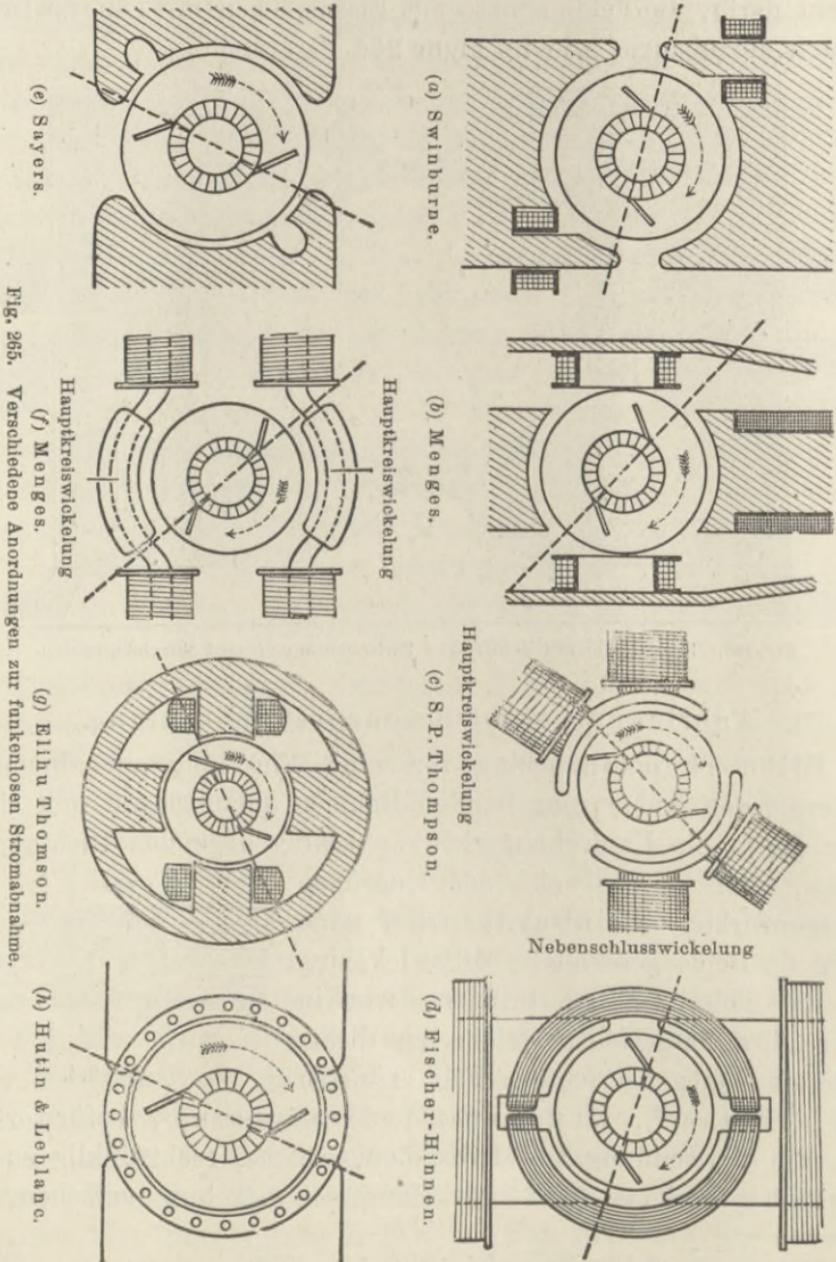


Fig. 265. Verschiedene Anordnungen zur fanlosen Stromabnahme.

so dass in dem Maasse, wie die Gegenwirkung des Ankers das Feld vorwärts zu verschieben strebte, letzteres sich selbstthätig rückwärts verschieben sollte. Menges¹⁾ schlug 1884 eine Wickelung vor

1) D. R.-P. Nr. 34465.

(Fig. 265 *b*), bei der die Hilfswindungen so angebracht waren, dass sie ein rechtwinklig gegen das Hauptfeld gerichtetes Nebenfeld hervorbrachten. Er gab noch eine Anordnung an, wobei in Reihen geschaltete Windungen auf den Poltheilen einer Maschine mit doppeltem magnetischen Kreise angeordnet waren, Figur 265 *f* Fischer-Hinnen¹⁾ bringt diese Hilfswicklung in einer im Mittelpunkt der Poloberfläche (Fig. 265 *d*) liegenden Nuth an, eine Bauart, welche unabhängig von ihm auch Forbes, Mordey und der Verfasser ersannen.

Elihu Thomson²⁾ hat kürzlich eine andere Lösung vorgeschlagen, bei welcher er im rechten Winkel zum Anker unbewickelte Pole anwendet, durch welche er die Querströmung ab- und von hinten in die bewickelten Pole hineinleitet, dadurch das Feld stärkend, statt es zu schwächen.

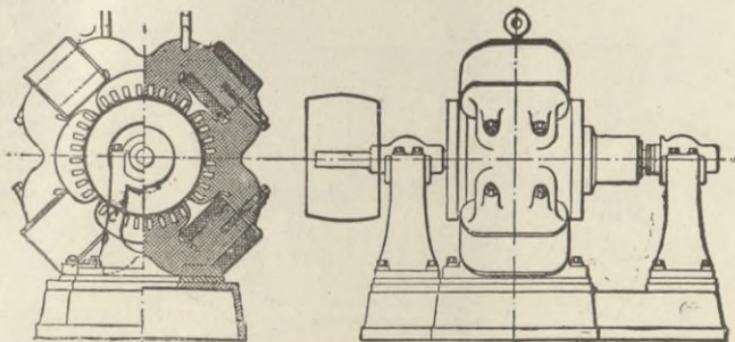


Fig. 266. Ryan's Dynamomaschine mit querliegenden Wickelungen.

Ryan³⁾ lässt eine Anzahl Windungen in Schlitze ein, die in die Poloberflächen parallel der Achse eingeschnitten sind, und welche in Reihen hintereinander verbunden annähernd eine neutralisierende Lage von Wickelungen bilden, mit einem Stromumlauf gleich und entgegengesetzt gerichtet dem Ankerstrom. Figur 266 zeigt eine neuere Ausführung von Ryan mit den in Schlitzen untergebrachten Wickelungen. Bei solchen Maschinen fällt weder die Magnetisierung mit wachsender Belastung, noch verschiebt sich der neutrale Punkt. Ferner kann der Luftzwischenraum sehr klein

1) Berechnung elektrischer Gleichstrommaschinen (Zürich, 1892).

2) Electrical Review (N. Y.), Bd. 27, vom 18. Juli 1895.

3) „On a Method Balancing Armature Reaction“, Sibley Journal of Engineering, Bd. 7, vom 17. Oktober 1892; vergl. auch Ryan und M. E. Thompson, Amer. Inst. of Electr. Engin. 1895, wo die Ergebnisse von Untersuchungen solcher Maschinen gegeben sind: abgedruckt im Electrician, Bd. 34, S. 765, vom 19. April 1895.

gemacht und so das Gewicht der Feldmagnete vermindert werden. Der gänzliche Fortfall jeder Störung des Feldes bei allen Belastungen ist ein Gewinn; es scheint aber für eine vollständig funkenlose Stromabnahme besser zu sein, ein geeignetes Feld besonders vorzusehen, als sich von der Möglichkeit abhängig zu machen, ein solches irgendwo in der Nähe der Polspitzen zu finden. Dies schlägt Ryan vor, in der in Figur 267 gezeigten Weise auszuführen, dass der Raum zwischen den Polen *C* und *D* durch eine Eisenconstruction überbrückt wird, die bei *klmnop* zur Aufnahme einer Ausgleichswicklung geschlitzt und mit einem besonderen, dem Zwecke der Stromumkehrung dienenden Zinken in der Mitte dieser

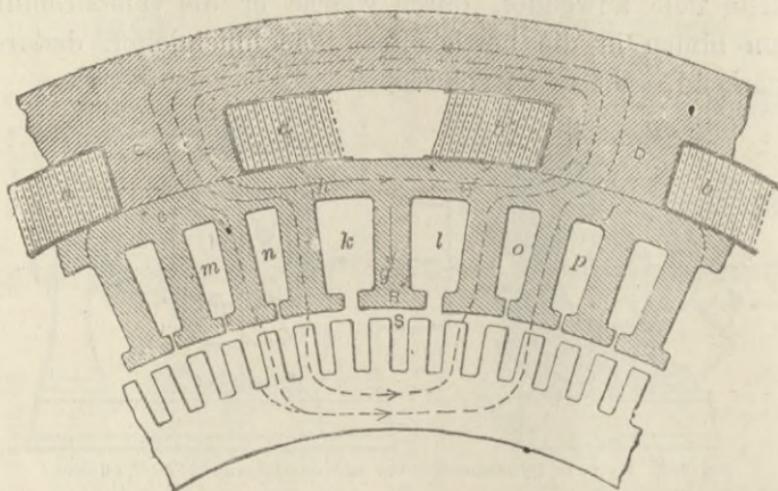


Fig. 267. Ryan's Ausgleichsmethode.

Wicklung versehen ist. Ist die Maschine unbelastet, so ist dieser Zinken ohne Magnetismus; sobald aber die Belastung steigt, strebt die Zahl der Amperewindungen in dieser Ausgleichswicklung, soweit sie über die Zahl der das Querfeld erzeugenden Amperewindungen des Ankers hinausreicht, den Zinken in der Richtung des Pfeiles zu magnetisiren, so ein zur Stromwendung geeignetes Feld schaffend, welches fast dem umzuwendenden Strom proportional ist.

Endlich haben noch Hutin und Leblanc vorgeschlagen, die Funkenbildung zu hindern durch Anwendung einer von ihnen »ammortisseur« genannten Vorrichtung, welche darin besteht, dass eine Reihe von Kupferstäben durch Löcher in den Polstirnflächen gesteckt und an den beiderseitigen Enden durch zwei Kupferringe miteinander verbunden, also kurzgeschlossen wird (Fig. 265 h).

Zusammendrängung des Feldes.

Es giebt noch einige andere Methoden, an dem führenden Rande der Pole die erforderliche Concentration des Feldes zu sichern. Es ist natürlich wünschenswerth, dass das Feld magnetisch starr, d. h. nicht leicht zu verzerren sei. Diese Steifigkeit des Feldes kann zum Theil durch sorgfältige Formgebung der Polstücke erreicht werden. Eine einfache Ausbuchtung in den Polflächen, wie in der Figur 265 *e* dargestellt, bewirkt eine Concentration des Feldes an der Spitze. Wenn die Spitze selbst nahezu gesättigt ist, kann die Verzerrung nicht so gross werden, als wenn dies nicht der Fall ist.

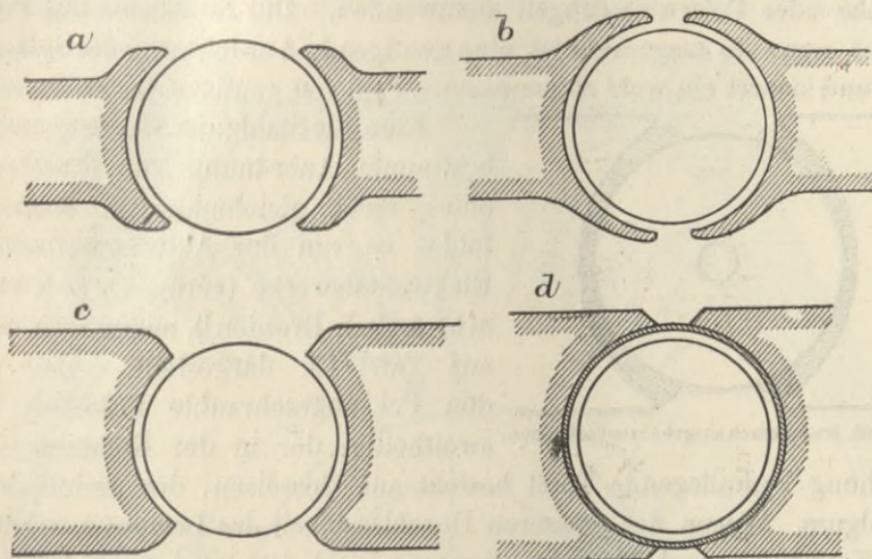


Fig. 268. Verschiedene Formen von Polspitzen.

Spitzen, welche, wie in Figur 268 *a*, weit ausgedehnt sind, sind nicht immer gut, selbst wenn sie dünn sind. Es ist dann besser, sie so breit auszugestalten, dass sie fast zusammentreffen, wie in Figur 268 *b*, so dass sie sich noch durch das zerstreute Feld sättigen, oder sie sonst abzuschneiden, wie in Figur 268 *c*. Dobrowolsky empfiehlt, die Pole wie in Figur 268 *d* zu gestalten, bei welcher Form die Wicklung vollständig von Eisen umgeben ist.

Diese Formen weichen ausserordentlich voneinander ab, was den Raum anbetrifft für die Ausbreitung des magnetischen Feldes zwischen den Spitzen. Es ist von Vortheil, wenn das Feld da, wo die Leiter eintreten, einen Raum darbietet, wo die Stromdichte von Null bis zu einem hohen Werthe anwachsen kann. Ist dieser Raum zu gering, so wird zwar der neutrale Punkt sehr scharf bestimmt sein, aber die Bürsten müssen alsdann auch sehr genau eingestellt

werden. Ist dieser Raum zu gross, so wird auch die Bürstenverschiebung bei verschiedenen Belastungen zu gross. Ein Weg, einen genügenden Spielraum für die Ausbreitung des Feldes zwischen den Spitzen und gleichzeitig eine genügende Steifigkeit gegen Verzerrung zu erreichen, besteht darin, die Poloberflächen nach einem grösseren Radius auszudrehen, so dass der Zwischenraum am mittleren Theile enger ist, als an den Polspitzen, wie in Figur 269 dargestellt ist. Eine andere Methode, welche Brown bei seinen vierpoligen Maschinen (Fig. 276) als gut erkannt hat, besteht darin, die innen vorstehenden Pole zwar kreisförmig auszudrehen, jedoch ohne Polschuhe oder Polerweiterungen anzuwenden. Die Endfläche der Pole bietet, wenn sie ausgedreht ist, eine genügende Ausdehnung der Spitzen dar und sichert ein wohl abgemessenes Feld von genügender Steifigkeit.

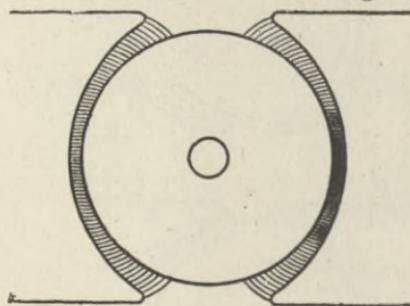


Fig. 269. Excentrisch ausgebohrte Polflächen.

Eine für Stahlguss-Magnetgestelle bestimmte Anordnung zur Erzielung eines recht gleichmässigen Magnetfeldes ist von der Aktiengesellschaft Elektrizitätswerke (vorm. O. L. Kummer & Co.), Dresden¹⁾, angegeben und auf Tafel IX dargestellt. Der an den Pol angeschraubte Polschuh ist zweitheilig, der in der Richtung der Drehung voranliegende Theil besteht aus Gusseisen, der andere aus Stahlguss. Wegen der grösseren Durchlässigkeit des Letzteren werden die Kraftlinien nach rückwärts gezogen, und dies wird noch dadurch unterstützt, dass die Berührungsfläche des Stahlgusstheiles mit dem Pol grösser ist, wie die des andern Theiles.

Wird die Drehrichtung umgekehrt, so müssen auch die Polschuhe umgedreht werden.

Selbstaussgleichende Wickelungen.

Wenden wir uns nun zu den Versuchen, den Anker selbst zur Ausgleichung zu benutzen, so finden wir auch hier verschiedene Vorschläge. Swinburne's Sehnenwicklung (S. 232) vermindert die entmagnetisirende, nicht aber die quermagnetisirende Kraft. Sie hat den Nachtheil, dass die beiden Enden jeder Abtheilung nicht im gleichen Moment in das umkehrende Feld gelangen, und ist daher bei Maschinen mit grosser Leistung und geringem Spielraum zur Verschiebung der Bürsten nicht bequem zu behandeln. Ihre Aufgabe ist, eine Maschine

1) D. R.-P. 104022.

zu liefern, welche bis zur Grenze der Funkenbildung eine so geringe entmagnetisirende Gegenwirkung hat, dass es nicht nothwendig ist, die Erregung zu steigern, wenn die Belastung wächst. Edison¹⁾ hat eine Hilfswicklung vorgeschlagen, ebenso die Anwendung von zwei Bürstensätzen mit verschiedenen Voreilungen.

Die besten Vorschläge stammen von Sayers²⁾, welcher die Stäbe des Stromabgebers mit passenden Punkten der Ring- oder Trommelwicklung verbindet, und zwar nicht direct durch gewöhnliche radiale Verbindungsstücke, sondern durch Ausgleichswicklungen, welche ebenfalls auf den Anker aufgewickelt sind. Eine dieser Stromabgeberwicklungen ist in Figur 270 dargestellt; das eine Ende ist mit der

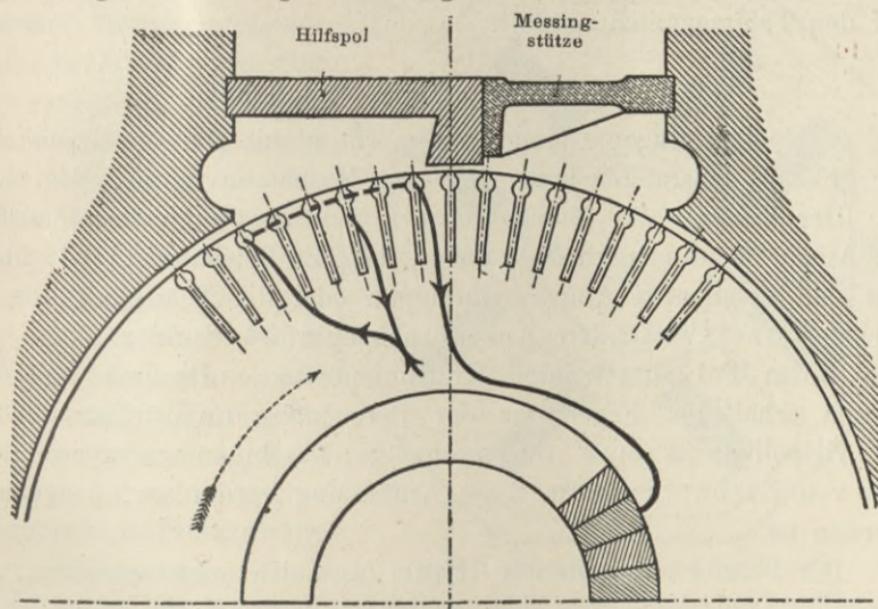


Fig. 270. Sayers' Ausgleichswicklung mit Stromabgeberwicklung.

Verbindungsstelle zwischen zwei Hauptwicklungsspulen vereinigt, das andere an eine Stromabberschiene gelegt. In dem Augenblick, bevor die Schiene mit der Bürste in Contact tritt, wird der ganze Ankerstrom durch eine oberhalb der dargestellten Wicklungsabtheilung liegende Stromabgeberwicklung aufgenommen. Wenn die Kante der Bürste den Stromabgeberstab berührt, befindet sich das linke Ende der zugehörigen Stromabgeberwicklung gerade unter der Polspitze, so dass sie bereit ist, den Strom aufzunehmen; während nun die Stromabgeberrolle vorrückt, gelangt ihre rechte Seite gerade unter

1) Englisches Patent [1883] Nr. 5127.

2) Journ. Inst. Electr. Eng., vom Juli 1893, Bd. 22, S. 377; ferner Bd. 24, S. 122. 1895.

den Hilfspol, wodurch das Bestreben entsteht, den Strom anzuhalten und ihn in dem zwischenliegenden Theil der Hauptwicklung umzukehren.

Die Stromabgeberwicklung hat in der Figur 270 gerade den Strom aufgenommen. Im nächsten Augenblicke wird ihre rechte Seite unter den Hilfspol kommen, der den Strom in ihr anhalten und ihn zur nächsten Stromabgeberwicklung führen wird. Zuweilen ist der Hilfspol gewickelt wie in Figur 263. Der Hauptvortheil der Wickelung von Sayers besteht darin, dass man bei ihr den Bürsten, statt sie vorwärts zu verstellen, eine nach rückwärts liegende Stellung geben kann, wodurch der Ankerstrom eine günstige magnetisirende Wirkung ausübt, so dass die Nothwendigkeit einer Verbundwicklung auf den Feldmagneten entfällt.

Entwurf vielpoliger Maschinen.

Zweipolige Magnete sind bequem für kleine Dynamomaschinen; für grössere Leistungen sind vielpolige Maschinen vorzuziehen.

Der Vortheil der Benutzung des Werthes Q (Umfluss) anstatt der Amperewindungen besteht darin, dass die Belastungsgrenze nicht von den gesammten Amperewindungen oder der Thätigkeit des als Elektromagnet wirkenden Ankers abhängig ist, sondern von der von einem Pol ausgehenden Kraftlinienmenge. Deshalb sind die bereits erhaltenen Ergebnisse der Berechnung unmittelbar sowohl für vielpolige als auch für zweipolige Maschinen zu verwenden, wie von Esson, dem wir diese Auffassung verdanken, festgestellt worden ist.

Die Formel auf Seite 360 (Mitte) lässt sich auch schreiben:

$$Q = \frac{277 \mathfrak{B} l_2}{\phi},$$

wenn \mathfrak{B} die Feldstärke in dem Zwischenraum bedeutet.

Setzen wir die Grenzwerte von Q und den Werth \mathfrak{B} als bekannt voraus, und nehmen ϕ , die polare Winkelweite, zu 130 Grad an, so folgt, dass die radiale Tiefe l_2 des Zwischenraumes nicht weniger als $\frac{1}{28}d$ für Ringe, und für Trommeln nicht weniger als $\frac{1}{18}d$ betragen darf. Wenn wir dann, um eine Maschine mit grosser Leistung herzustellen (während wir an zwei Polen festhalten), d vergrössern, so muss entweder l_2 oder \mathfrak{B} vergrössert oder aber ϕ vermindert werden, oder es muss irgend eine Vereinigung dieser Vorgänge erfolgen, die eine grössere Kraftabgabe zur Erhaltung des Feldes in dem Zwischenraum gewährt. Hierin liegt der Vortheil der vielpoligen Bauart für grosse Leistungen begründet. Es sei eine Form, wie in der Figur 271

dargestellt, gegeben. Um einer Zerstreung von Pol zu Pol vorzubeugen, ist der Polabstand in Bezug auf die polare Breite grösser als bei zweipoligen Maschinen. Für einen gleich grossen Werth von \mathfrak{B} in den Zwischenräumen ist der Ringquerschnitt ermässigt, sein Durchmesser und damit auch der Durchmesser der Abkühlungsfläche vergrössert. Bei Trommelwickelungen entsteht dazu noch der Vortheil, dass die Endverbindungen viel einfacher sich gestalten und dass die Lüftung leichter erfolgt als in zweipoligen Maschinen. Lohnt sich aber auch für den Maschinenbauer die Anwendung? Es entsteht etwas mehr Mühe bei der Bearbeitung der Gussstücke, wird man aber dagegen an Kupfer sparen? Der nachstehende Fall zeigt, dass, wenn eine gewisse Grösse der Maschine überschritten wird, in der That eine Ersparniss eintritt. Wir betrachten eine zweipolige Maschine mit Trommelanker, bei der $d = 50$, $L = 90$, $\mathfrak{B} = 5000$ in dem Zwischenraum, $\psi = 130$ Grad ist. Wenn nicht der Zwischenraum l_2 mindestens 3,2 cm misst, so herrscht keine Funkenlosigkeit, d. h. es muss 0,9 cm

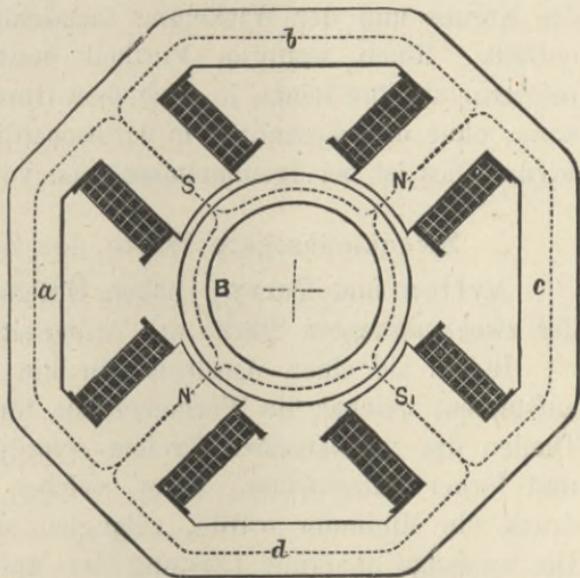


Fig. 271. Vierpoliger Magnet von Brown.

Raum mehr, als für die Wickelungen und zum Spielraum nothwendig ist, vorhanden sein. Vermindern wir nun zur Erreichung der Funkenlosigkeit den Zwischenraum und vergrössern \mathfrak{B} auf 7000 oder vermindern ψ auf 100 Grad, so wird noch Nichts an magnetisirender Kraft gewonnen. Setzen wir für diesen Anker eine vierpolige Trommel ein, wobei $d = 84$, $L = 45$, $\mathfrak{B} = 5000$ ist. Bei diesem vergrösserten Durchmesser lässt sich der Zwischenraum auf ein Minimum bringen, die magnetisirende Kraft kann mindestens um 30 Procent, das Gesamtgewicht des Eisens um mindestens 40 Procent ermässigt werden, und dies giebt mehr als Ersatz für die besondere Mühe bei der Bearbeitung.

Esson führt aus, dass die Kosten für eine vierpolige Maschine mit der Leistung W bei einer Geschwindigkeit n den Kosten für zwei Maschinen gleichzusetzen sind, von denen jede bei einer Geschwindigkeit $2n$ die Leistung $\frac{1}{2}W$ besitzt u. s. w. Die Kosten für

den Guss des Feldmagnetes und das Gewicht werden geringer, wenn, wie bei den grossen Maschinen von Siemens & Halske (Tafel VIII), der Ring so grosse Abmessungen besitzt, dass der Feldmagnet im Innern des Ringes untergebracht werden kann.

Sollen Maschinen von über 100 Kilowatt Leistung hergestellt werden, so ist die vielpolige Form der zweipoligen vorzuziehen, und zwar 1. weil sie bei der höchsten Leistung und dem geringsten Spielraum zwischen Anker und Polflächen funkenlos arbeiten und deshalb das geringste Kupfergewicht auf dem Magnet erfordern; 2. weil sie beim Betriebe kälter bleiben, so dass auf eine gegebene Masse des Kernes und der Wicklung thatsächlich eine grössere Leistung entfällt. Einen weiteren Vortheil besitzen vielpolige Maschinen insofern, als ihre Länge je nach dem Durchmesser verändert werden kann, ohne dass wesentlich in wirthschaftlicher Beziehung eingebüsst wird. Dies ist bei Trommelmaschinen von Bedeutung.

Zweckmässigste Weite des Zwischenraumes.

Ayrton und Perry¹⁾ haben Untersuchungen zur Ermittlung der zweckmässigsten Stärke der Ankerleiter angestellt.

Indem sie einen Ausdruck für die gesammten Wärmeverluste aufstellten, welcher die Wärmeverluste für die in den verschiedenen Theilen des magnetischen Kreises erforderliche Erregung umfasste, und ferner untersuchten, unter welchen Bedingungen dieser Ausdruck ein Minimum würde, gelangten sie zu folgendem Schlusse: Die zulässige dauernde Leistung der Maschine wird ein Maximum, wenn die Dicke der Ankerwicklung derartig ist, dass der magnetische Widerstand des von der Ankerwicklung eingenommenen Raumes gleich dem Widerstand des übrigen magnetischen Kreises ist.

Nimmt man an, dass der gesammte Raum zwischen Anker und Polstücken praktisch als mit der Ankerwicklung ausgefüllt anzusehen ist, so lässt sich das vorstehende Gesetz dahin ausdrücken, dass bei gegebener Bauart des Ankers die Maschine auf einen solchen Grad der Erregung gebracht werden müsste, dass der gesammte magnetische Widerstand doppelt so gross wird, als der Widerstand des Zwischenraumes. Dies ist aber nichts Anderes als der diakritische Zustand der Magnetisirung; die Durchlässigkeit des gesammten magnetischen Kreises — Eisen und Luft zusammen — wird in diesem Zustand auf den halben Anfangswerth verringert.

1) Vergl. die Abhandlung im Phil. Mag. für Juni 1888.

Biblioteka Politechniki Krakowskiej



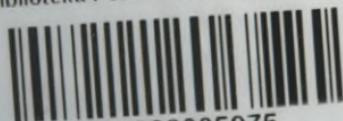
II-349380

Biblioteka Politechniki Krakowskiej



II-5364

Biblioteka Politechniki Krakowskiej



100000305975

Biblioteka Politechniki Krakowskiej



100000294760