

Biblioteka Politechniki Krakowskiej



100000299109

GRUNDZÜGE

der

WECHSELSTROM-TECHNIK

Eine gemeinfaßliche Darstellung der Grundlagen
der

Elektrotechnik der Wechsel- und Mehrphasenströme
für

Ingenieure, Architekten, Industrielle, Militärs, Techniker
und Studierende an technischen Mittelschulen.

Mit 505 Abbildungen und 1 Diagrammtafel.

Von

RICHARD RÜHLMANN

Dr. phil. und Professor.

Zugleich Ergänzungsband zu desselben Verfassers:
Grundzüge der Gleichstromtechnik.

Zweite, umgearbeitete Auflage.

F. Nr. 25453
16/2



Leipzig

Verlag von Oskar Leiner

1904.



115465

Das Recht der Übersetzung vorbehalten!

Akc. Nr. 5244/50

Vorwort zur ersten Auflage.

Die bedeutungsvollsten und für das gesamte industrielle Leben wichtigsten neuen Fortschritte auf dem Gebiete der Elektrotechnik beziehen sich auf die Erzeugung, Umformung und Verwendung der Wechselströme und Mehrphasenströme.

Eine zusammenfassende Darstellung dieser Fortschritte hat bisher, obwohl vielfach begehrt, noch gefehlt. Und so war dem Verfasser von den verschiedensten Seiten wiederholt der Wunsch ausgesprochen worden, gewissermaßen als Fortsetzung seiner »Grundzüge der Elektrotechnik des Gleichstromes«, nunmehr auch das Gebiet der Wechsel- und Mehrphasenströme in ähnlicher, gemeinverständlicher Weise zu bearbeiten.

Diesen Wunsch zu erfüllen, würde nicht möglich gewesen sein, wenn nicht gerade diejenigen Firmen, die vorzugsweise mit ihren Arbeiten und Konstruktionen die führende Stellung auf diesem Gebiete einnehmen, ihn in liebenswürdigster Weise durch Auskünfte und Mitteilungen von Zeichnungen und Beschreibungen unterstützt hätten.

Es ist das Bestreben des Verfassers gewesen denjenigen Ingenieuren, Industriellen und Militärs, denen zu erschöpfenden, wissenschaftlichen Studien über Wechsel- und Mehrphasenströme keine Zeit bleibt, ein möglichst anschauliches Bild davon zu geben, durch welche Vorrichtungen solche Ströme erzeugt, wie sie, dem wechselnden Bedürfnisse entsprechend, umgeformt werden, und in welcher Weise sie verteilt und nutzbar gemacht werden können.

Für das Verständnis verschiedener Vorgänge auf diesem Gebiete ist die Bekanntschaft mit etwas eingehenderen mathematischen und physikalischen Betrachtungen nicht zu entbehren. Die in den »Grundzügen der Gleichstromtechnik« gegebenen theoretischen Belehrungen reichen für den vorliegenden Zweck nicht völlig aus.

Diese Ergänzung der theoretischen Grundlagen ist vorzugsweise in den ersten Kapiteln zusammengestellt; einige die Mehrphasenströme betreffenden Erläuterungen sind in die betreffenden Abschnitte eingeschaltet.

Auf den Gebrauch der Differential- und Integralrechnung ist durchaus verzichtet; von der Theorie ist überhaupt nur soviel mitgeteilt worden, als zum Verständnis der Konstruktionen, Anordnungen und Methoden unbedingt erforderlich ist.

Aus allem dürfte hervorgehen, daß die in den nachstehenden Blättern enthaltene Arbeit sich nicht in erster Linie an die wissenschaftlich gebildeten Elektrotechniker wendet. Deren Bedürfnisse sind durch die klassischen Werke von Gisbert Kapp, Bedell und Crehore, Feldmann, Steinmetz und Silvanus Thompson, die auch der Verfasser benutzt hat, nahezu vollständig befriedigt. Da aber einige Materialien hier überhaupt zum ersten Male weiteren Kreisen mitgeteilt werden, andere in Zeitschriften verstreute Angaben hier am entsprechenden Platze sich zusammengefaßt vorfinden, können jüngere Fachgenossen das Buch zur Einführung in das Studium der Wechselstromtechnik und zur vorläufigen Orientierung gewiß mit Nutzen verwenden.

Als Hauptaufgabe hat es der Verfasser angesehen, den weiteren Kreisen, denen es mehr auf eine Einsicht in dieses Gebiet als auf das für den selbsttätig schaffenden Konstrukteur unerläßliche tiefgehende Verständnis ankommt, eine Übersicht über den in Frage kommenden Stoff zu geben.

Auf das Eingehen in verschiedene, lediglich den Fachmann interessierende Feinheiten mußte daher verzichtet werden; ebenso sind nicht alle Möglichkeiten der Lösungen gewisser Aufgaben mitgeteilt, sondern mehrfach ist nur an einzelnen Beispielen gezeigt worden, auf welche Weise Schwierigkeiten überwunden werden können.

Der Verfasser hegt die Hoffnung, daß diese Darstellung auch dazu beitragen wird die ablehnende Haltung überwinden zu helfen, die manche sonst dem Fortschritte durchaus zugeneigte Ingenieure und Industrielle bisher gegen die Einführung der Wechsel- und Mehrphasenströme in die Praxis lediglich deshalb gezeigt haben, weil ihnen diese neuen Systeme nicht völlig verständlich und durchsichtig waren. Besonders deshalb sind auch der Messung und der Verteilung dieser Ströme am Schlusse des Buches kurze Kapitel gewidmet.

Allen jenen Herren und Firmen, die den Verfasser in so gütiger Weise bei dieser Arbeit unterstützt haben, gestattet er sich an dieser Stelle den herzlichsten Dank abzustatten.

Möge diese Arbeit in den Kreisen, für die sie bestimmt ist, eine freundliche Aufnahme finden und dem Verständnis der immer wachsenden Bedeutung der elektrotechnischen Industrie für die gesamte Kultur nützliche Dienste leisten.

Döbeln, Mitsommer 1897.

Der Verfasser.

Vorwort zur zweiten Auflage.

Als ich die erste Auflage dieses Buches der Öffentlichkeit übergab, war das Gebiet der Wechselstromtechnik noch in keiner Kultursprache in einem zusammenfassenden Werke einigermaßen erschöpfend behandelt. Seitdem hat sich das allgemeine Interesse mehr und mehr diesen technisch und wirtschaftlich so überaus wichtigen Dingen zugewendet, und eine große Anzahl wertvoller Abhandlungen und bedeutender Monographien berichtet über zahlreiche neue Entdeckungen, Erfindungen und Methoden der Darstellung auf diesem von vielen hervorragenden Ingenieuren und Physikern erfolgreich bearbeiteten Felde menschlicher Tätigkeit.

Eine neue Auflage dieses Buches, die in so überraschend kurzer Zeit sich nötig gemacht hat, bedeutete daher so ziemlich eine völlig neue Bearbeitung des inzwischen außerordentlich angewachsenen Stoffes.

Da zahlreiche Lücken in unseren Kenntnissen durch neue Arbeiten nunmehr ausgefüllt worden sind, konnte diesmal eine schärfere logische Gliederung des Stoffes zur Anwendung gebracht werden.

Aus ursprünglich 11 Kapiteln sind deren 36 geworden, obgleich mancher Abschnitt ausgelassen werden konnte, weil er inzwischen veraltet erschien, oder sein Inhalt bereits in der zweiten Auflage der Gleichstromtechnik sachgemäß behandelt worden war.

Ich hoffe, daß die erhebliche Vermehrung des Umfanges und des Inhaltes des Buches auch den Wert desselben entsprechend erhöht hat, daß der Anfänger eine leichtfaßliche Einführung in den heutigen Stand dieser schwierigen Wissenschaft darin finden, und daß auch der Fachmann nichts Wesentliches und Wichtiges vermissen wird.

Zahlreiche Literaturnachweise haben den Zweck solchen Lesern die Wege zu zeigen, die sich mit eingehenderen Studien über einen der behandelten Gegenstände befassen wollen.

Allen denjenigen, die mich durch Mitteilungen, Rat und Hilfe bei der Herstellung der neuen Auflage gütig unterstützt haben, spreche ich hierdurch nochmals meinen wärmsten Dank aus.

Döbeln, Februar 1904.

Der Verfasser.

Inhaltsübersicht.

—♦—

1. Kapitel.

Allgemeine Bemerkungen über den Wechselstrom.

	Seite
1. Das Wesen des Wechselstromes	1
2. Praktische Bedeutung des Wechselstromes	3
3. Summation von Wechselströmen und periodisch veränderlichen Spannungen	4
4. Andere graphische Darstellung periodisch veränderlicher Größen	7
5. Die Summation gleichartiger periodischer Veränderungen von gleicher Periode durch Vektordiagramm	8
6. Zusammensetzung mehrerer sich periodisch ändernder Größen von gleicher Periode	9
7. Die Mittelwerte periodisch veränderlicher Erscheinungen	11
8. Der Formfaktor und der Scheitelfaktor	13
9. Bestimmungen der effektiven Arbeit eines Wechselstromes	15

2. Kapitel.

Wechselstromkreise mit Widerstand und Selbstinduktion.

1. Wechselstrom in einem Stromkreise mit Selbstinduktion	20
2. Magnetisches Feld und Selbstinduktion	28
3. Der Selbstinduktionskoeffizient	30
4. Widerstände mit Selbstinduktion in Hintereinanderschaltung	32
5. Kurzschluß einer Wechselstrommaschine	35
6. Impedanz parallel geschalteter Widerstände mit Selbstinduktion	36
7. Die Drosselpulen als Beispiele für induktive Widerstände	40
8. Bestimmung einer Drosselpule, die vor eine Bogenlampe geschaltet wird	44
9. Beispiel einer Drosselpule, die einer Glühlampe parallel geschaltet ist	45

3. Kapitel.

Wechselstromkreis mit Kapazität und Widerstand.

1. Ein Kondensator in einem Wechselstromkreis	47
2. Eine mechanische Analogie des Kondensators	50
3. Wechselstromkreis mit Widerstand und Kapazität in Hintereinanderschaltung	52

4. Kapitel.

Wechselstromkreise mit Widerstand, Selbstinduktion und Kapazität.

1. Kapazität, Widerstand und Selbstinduktion in Hintereinanderschaltung im Wechselstromkreise	55
2. Elektrische Resonanz	57
3. Selbstinduktion und Kapazität in Parallelschaltung	60

	Seite
4. Kompensation eines in der Phase zurückbleibenden Stromes durch einen Nebenschluß, der einen Kondensator enthält	64
5. Verwendung einer Kapazität im Nebenschlusse zu zwei gleichen Selbstinduktionen	65
6. Der wattlose Strom	68
7. Kapazität, Ohmscher und induktiver Widerstand, die längs einer Wechselstromleitung verteilt sind. Ferrantisches Phänomen	69

5. Kapitel.

Die Darstellung von periodisch veränderlichen Werten durch komplexe Größen.

1. Die Zerlegung veränderlicher Größen in rechtwinkelige Komponenten	73
2. Die Einführung der imaginären Einheit $j = \sqrt{-1}$	74
3. Darstellung der Fälle von Widerstand und Selbstinduktion im Wechselstromkreis durch symbolische Ausdrücke.	76
4. Kapazität im Stromkreise	77

6. Kapitel.

Verwendung des Wechselstromes für chemische Zwecke.

1. Chemische Wirkungen des Wechselstromes	79
2. Unipolare Elektrizitätsleitung	79
3. Elektrolytische Kondensatoren	81
4. Erzeugung von Gleichstrom durch Wechselstrom	82

7. Kapitel.

Wärmewirkungen der Wechselströme.

1. Glühlampen im Wechselstrombetriebe	83
2. Das Wechselstrombogenlicht	84
3. Die scheinbare Phasenverschiebung bei Wechselstrombogenlicht	86
4. Die Lichtausstrahlung des Wechselstrombogenlichtes	88
5. Zusammenhang der elektrischen Größen bei Wechselstrombogenlicht	91
6. Die Effektbogenlampen mit Wechselstrombetrieb	91
7. Die unipolare Leitfähigkeit des Lichtbogens bei Wechselstrom	94
8. Allgemeines über Bogenlampen für Wechselstrom.	95
9. Einrichtung von Wechselstrombogenlampen	97

8. Kapitel.

Magnetische Wirkungen der Wechselströme.

1. Magnetisierungskurven für Eisenblech, Flußeisen, Schmiedeeisen und Gußeisen	101
2. Der Zusammenhang zwischen den verschiedenen bei der Magnetisierung in Betracht kommenden Größen.	102
3. Ein ringförmiger Wechselstromelektromagnet	103
4. Magnetische Kreisprozesse, Hysteresis	105
5. Über Wechselstrom-Elektromagneten	108
6. Wechselstromelektromagnete für Meßinstrumente.	113

9. Kapitel.

Besondere Induktionswirkungen der Wechselströme. Seite

1. Wirbelströme	115
2. Einfluß der Wirbelströme auf die Magnetisierung	119
3. Ungleichförmige Verteilung eines Wechselstromes in einem massiven Leiter. Skineffekt	120
4. Abstoßende Wirkungen des induzierenden auf den induzierten Wechselstrom	123

10. Kapitel.

Wellen von anderer als sinoidaler Form.

1. Mathematische Darstellung einer beliebigen Wellenform	126
2. Die in der Praxis auftretenden Kurvenformen	127
3. Einfluß der Kurvenform auf die Wirkungen des Wechselstromes	128
4. Die Bestimmung der Gleichung der Wellenform	129

11. Kapitel.

Allgemeines über Wechselstrommaschinen.

1. Geschichtliches	132
2. Einteilung der Wechselstrommaschinen	133
3. Einfacher Fall der Bewegung einer Spule in einem mehrpoligen Felde	135
4. Die Spule ist breiter als das Kraftlinienfeld	137
5. Die Spulen sind weniger breit als die Pole	140
6. Es folgen sich Felder von gleicher Richtung	141
7. Die Räume zwischen den aufeinander folgenden Magnetfeldern sind schmaler als die Polbreite	142
8. Schlußfolgerungen aus den Betrachtungen über die Abmessungen der Pole, Zwischenräume und Spulen	144
9. Einleitung in die Theorie der Wechselstrommaschinen	146
10. Vergleich der Wechselstrommaschinen und Gleichstrommaschinen	148
11. Einfluß der Breite der Pole, Zwischenräume, Spulen und der Dicke der Spulen auf die EMK; Spulenfaktor	149
12. Feldmagnetismus und Ankerrückwirkung	155
13. Die Größe des Selbstinduktionskoeffizienten eines Ankers	160
14. Vorausbestimmung des Spannungsabfalles einer Wechselstrommaschine durch die Belastung	163
15. Gang der Berechnung von Wechselstrommaschinen nach E. Arnold	167
16. Die Ankerwicklung	170
17. Spulenwicklung	172
18. Fortschreitende Wickelungen	176
19. Wickelungen für Mehrphasenströme	178

12. Kapitel.

Die Einrichtungen einiger gebräuchlicher Wechselstrommaschinen.

A. Maschinen mit Ringanker.

1. Maschinen von G. Kapp	180
2. Die Wechselstrommaschine von Fischinger	183
3. Gleichstrommaschinen mit Einrichtungen zur Abgabe von ein- und mehrphasigem Wechselstrom	187

B. Wechselstrommaschinen mit Trommelanker. Seite

4. Wechselstrommaschine mit Fremderregung von Blakey-Emmott & Co. (Halifax)	189
5. Wechselstrommaschinen der Westinghouse-Company (Stanley).	191
6. Die neue Wechselstrommaschine von Siemens & Halske, Mod. R.	192
7. Die Wechselstrommaschinen von Brown, Boveri & Cie.	194
8. Große Wechselstrommaschine von Helios Elektrizitäts-A.-G. in Köln	196

C. Wechselstrommaschinen mit Scheibenanker.

9. Die ältere Wechselstrommaschine von Siemens & Halske	200
10. Die ältere Wechselstrommaschine von Ferranti	201
11. Die neueren Wechselstrommaschinen von Ferranti	202
12. Die Wechselstrommaschine von Mordey	205

D. Induktormaschinen.

13. Die Wechselstrommaschine von Kingdon	207
14. Allgemeines über die eigentlichen Induktormaschinen.	208
15. Die Induktormaschinen der Allgemeinen Elektrizitätsgesellschaft und der Maschinenfabrik Oerlikon	213
16. Induktormaschine von Brown, Boveri & Co.	219
17. Allgemeine Bemerkungen über Induktormaschinen	219

13. Kapitel.

Drehstrommaschinen.

1. Allgemeines über Mehrphasenmaschinen	220
2. Die Spannungen und Stromstärken bei verkettetem Dreiphasenstrom	225
3. Wickelungsverhältnisse einiger ausgeführten Dreiphasenmaschinen	226
4. Die Drehstromgeneratoren der Kraftübertragungswerke in Rheinfelden	228
5. Großer Drehstromerzeuger der Maschinenfabrik Oerlikon	232
6. Die großen Drehstrommaschinen der Berliner Elektrizitätswerke	233
7. Neuere Konstruktionen der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft	237
8. Schmiedeeiserne Gehäusekonstruktionen von Siemens & Halske, A.-G.	240
9. Ältere Drehstrommaschine der Maschinenfabrik Oerlikon	242
10. Drehstrommaschine der Berliner Maschinenbau - Aktien - Gesellschaft (vormals L. Schwartzkopf)	246
11. Drehstrommaschine der Elektrizitäts - Aktien - Gesellschaft Schuckert & Co.	246
12. Die Materialbeanspruchung bei neueren Maschinen.	249

14. Kapitel.

Zweiphasenmaschinen.

1. Allgemeines über Stromerzeuger für Zweiphasenstrom	250
2. Zweiphasenmaschinen von Brown, Boveri & Cie.	250
3. Zweiphasenmaschine der ehemaligen Aktien - Gesellschaft Dresdener Elektrizitätswerke	252
4. Die Zweiphasenmaschine der Arbeitsübertragungsanlage am Niagara	253

15. Kapitel.

Theorie des Transformators.

	Seite
1. Begriff des Transformators und Benennungen	257
2. Geschichtliches über die Transformatoren	259
3. Die Theorie der Wechselstromtransformatoren unter Vernachlässigung der Streuung, der Hysterisis und der Wirbelströme	260
4. Graphische Darstellung der Vorgänge im Transformator und Einfluß der Veränderlichkeit der Permeabilität	265
5. Einfluß der magnetischen Streuung	268
6. Der Verlust im Eisen des Transformators	271
7. Die Kupferverluste im Transformator	274
8. Gesamtverlust, Wirkungsgrad, Leistungsfaktor des Transformators	275
9. Vorausberechnung des Wirkungsgrades eines gegebenen Transformators für eine bekannte Belastung	278
10. Verzerrung der Gestalt der Stromkurve infolge der Hysterisis	280
11. Der Leerlaufstrom eines Transformators	283

16. Kapitel.

Das Entwerfen von Transformatoren.

1. Einrichtung der Transformatoren im allgemeinen	287
2. Gang der Berechnung eines Transformators	289
3. Vorausberechnung eines Manteltransformators	291
4. Vorausberechnung eines Kerntransformators	298

17. Kapitel.

Arbeitsverhältnisse der Transformatoren.

1. Die Arbeitsdiagramme eines idealen Transformators	301
2. Die Arbeitsdiagramme eines wirklichen Transformators	305
3. Bestimmung der Streuung aus einem Versuche mit kurzgeschlossener Sekundärwicklung	307
4. Vorherbestimmung des Spannungsabfalles eines Transformators bei induktionsfreier Belastung	308
5. Vorausbestimmung des Spannungsabfalles bei induktiver Belastung	310

18. Kapitel.

Beschreibung ausgeführter Transformatoren.

1. Transformator von Siemens & Halske, A.-G.	314
2. Transformatoren der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft	318
3. Neuer Transformator von Helios.	319
4. Transformator der Maschinenfabrik Oerlikon	320
5. Transformatoren von Brown, Boveri & Cie.	322
6. Transformatoren der E.-A.-G. vorm. W. Lahmeyer & Co.	325
7. Transformator der Westinghouse Co.	327
8. Neue Manteltransformatoren Type AWO der Allgemeinen Elektrizitäts- Gesellschaft in Berlin.	327
9. Transformatoren der E.-A.-G. vormals Schuckert & Co.	329
10. Neue Transformatoren der Berliner Maschinenbau-A.-G., vormals L. Schwartzkopf	330

	Seite
11. Manteltransformatoren der Siemens-Schuckert Werke	332
12. Drosselpulen und Transformatoren mit offenem magnetischen Kreise	333
13. Drosselpulen mit Lampen in Hintereinanderschaltung	334
14. Drosselpulen parallel zu den Lampen	336
15. Abzweigtransformatoren	337
16. Sicherheitsmaßregeln beim Gebrauche von Transformatoren	339

19. Kapitel.

Synchronmotoren für einphasigen und mehrphasigen Wechselstrom.

1. Allgemeines über synchrone Wechselstrommotoren	342
2. Die Wirkungsweise der Synchronmotoren	345
3. Der synchrone Drehstrommotor	348
4. Die Leistung des Synchronmotors	349
5. Der Synchronmotor als Stromerzeuger	352
6. Der Einfluß der Erregung	353
7. Die Haupteigenschaften der Synchronmotoren	355

20. Kapitel.

Der Zweiphasenmotor.

1. Entstehung eines magnetischen Drehfeldes durch zwei in der Phase verschiedene Wechselströme	356
2. Verkettung der Zweiphasenströme	359
3. Wirkungsweise des Zweiphasenmotors	361
4. Die Eigenschaften des Zweiphasenmotors	364
5. Elektromotoren für Zweiphasenstrom	366

21. Kapitel.

Allgemeines über asynchrone Drehstrommotoren.

1. Entstehung eines Drehfeldes bei Drehstrom	370
2. Verkettung der Ströme	372
3. Die Betriebseigenschaften des asynchronen Drehstrommotors	374
4. Die Vorzüge des Drehstromsystems	375

22. Kapitel.

Theorie der Drehstrommotoren.

1. Analytische Theorie der Dreiphasenmotoren nach E. Arnold	378
2. Die Vorgänge im ruhenden Anker; der Anlauf	379
3. Verhalten des Drehstrommotors, wenn der Anker rotiert	387
4. Die Berechnung des Magnetisierungsstromes und des Belastungsstromes	390
5. Bestimmung des Ständers eines Drehstrommotors	392
6. Bestimmung des Läufers eines Drehstrommotors	395
7. Das Anlassen größerer Drehstrommotoren mit Zusatzwiderstand in der Läuferwicklung	397
8. Vorbereitende Erläuterungen zum Heylandschen Diagramm	398
9. Das Heylandsche Diagramm des Drehstrommotors	401
10. Der asynchrone Drehstrommotor als Stromerzeuger	405

23. Kapitel.

Beschreibung ausgeführter Drehstrommotoren nebst Zubehör.

	Seite
1. Drehstrommotoren der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft	408
2. Drehstrommotoren der Maschinenfabrik Oerlikon	411
3. Drehstrommotoren von Siemens & Halske	415
4. Drehstrommotoren von Brown, Boveri & Cie.	416
5. Drehstrommotoren der Elektrizitäts - Aktien - Gesellschaft vormals W. Lahmeyer & Co. in Frankfurt a. M.	418
6. Anlaß- und Umsteuereinrichtungen	421
7. Regelung der Umlaufzahl der Drehstrommotoren	424

24. Kapitel.

Einphasige Wechselstrommotoren.

1. Allgemeines über asynchrone einphasige Wechselstrommotoren	432
2. Die Anlaßvorrichtungen für Einphasenmotoren	435
3. Beschreibung einiger ausgeführter einphasiger Asynchronmotoren	438
4. Erklärung der Wirkungsweise der asynchrone Wechselstrommotoren	442

25. Kapitel.

Kollektormotoren und Reaktionsmotoren.

1. Konduktionsmotoren	446
2. Reaktionsmotoren	447
3. Der Kollektor als Frequenzwandler	448
4. Die Kompensierung der wattlosen Ströme	449
5. Die Regelung der Umdrehungszahl bei Kollektormotoren	451
6. Kreisdiagramm des Kollektormotors	452
7. Heylands kompenzierte und compoundierte asynchrone Motorgeneratoren	456

26. Kapitel.

Messung von Wechselspannungen.

1. Spannungsmessungen von Wechselströmen mit dem Quadrantelektro- meter	461
2. Das astatische Elektrodynamometer von Siemens & Halske	462
3. Präzisions-Spannungsmesser für Wechselströme	465
4. Präzisionsvoltmeter der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft	468
5. Älterer Spannungszeiger von Siemens & Halske, A.-G.	469
6. Andere Spannungsmessinstrumente	471
7. Wechselstrom - Induktionsvoltmeter der Allgemeinen Elektrizitäts- Gesellschaft	471
8. Meßschaltung für Hochspannungsanlagen der E.-A.-G. vorm. W. Lahmeyer & Co. in Frankfurt a. M.	473

27. Kapitel.

Messung der Stärke von Wechselströmen.

1. Messung der Stromstärken von Wechselströmen	475
2. Stromzeiger von Siemens & Halske	475
3. Präzisionsstrommesser von Siemens & Halske	477
4. Präzisionsstrommesser der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft	478
5. Induktions-Ampèremeter der A. E.-G.	479

28. Kapitel.

Leistungsmesser für Wechsel- und Drehstrom.

	Seite
1. Arbeitsmessung bei Wechselstrom	481
2. Theorie des Wechselstrom-Wattmeters	484
3. Arbeitszeiger für Gleichstrom, Wechselstrom und Drehstrom von Siemens & Halske	486
4. Arbeitszeiger von W. Thomson	488
5. Induktions-Wattmeter der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft	489
6. Tragbares aperiodisches Weston-Präzisions-Wattmeter	491
7. Präzisionswattmeter der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft	494
8. Arbeitsmessung bei Drehstrom	496
9. Leistungsmessung in Zweiphasenstromkreisen	501
10. Messung von Phasenverschiebungen mittels des Wattmeters	501

29. Kapitel.

Messung des Phasenunterschiedes.

1. Phasenmesser der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft	503
2. Phasenmesser von Hartmann und Braun	507
3. Phasenmesser für Drehstrom von Punga	508
4. Messung des wattlosen Stromes	509

30. Kapitel.

Die Bestimmung der Formen der Wechselstromkurven.

1. Prinzipien der angewendeten Methoden	511
2. Die optische Methode von Oskar Frölich (1887)	513
3. Der Oszillograph	515
4. Weinholds Kurvenzeichner unter Anwendung der Braunschen Röhre	517
5. Methode von Drexler mit Abänderungen von Behn-Eschenburg	520
6. Frankes Kurvenindikator	523

31. Kapitel.

Messung der Frequenz und der Schlüpfung.

1. Messung der Periodenzahl	526
2. Messung der Schlüpfung	528

32. Kapitel.

Messung von Selbstinduktionskoeffizienten.

1. Allgemeines	532
2. Methode von Kempe	533

33. Kapitel.

Wechsel- und Drehstromzähler.

1. Einteilung der Zähler	535
2. Die Theorie der Drehfeldzähler	536
3. Die Mittel, um eine Phasenverschiebung um 90° zu erzielen	538

	Seite
4. Drehfeldmeßgeräte von Siemens & Halske	542
5. Drehfeldzähler der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft	548
6. Der Wechselstromzähler der Union Elektrizitäts-Gesellschaft	549
7. Wechselstromzähler von Schuckert & Co.	551

34. Kapitel.

Das Arbeiten mit parallel geschalteten Wechselstrom- und Drehstrommaschinen.

1. Bedingungen für das Parallelschalten von Wechselstrommaschinen	554
2. Die Ausgleichsströme parallel laufender Maschinen	555
3. Abschalten einer in Parallelbetrieb befindlichen Wechselstrommaschine	557
4. Zuschalten einer neuen Maschine	558
5. Die Verstellvorrichtung der Zentrifugalregulatoren	560
6. Der Phasenvergleich	562
7. Das Pendeln parallel geschalteter Wechselstrommaschinen	567
8. Mittel zum Verhüten des Pendelns	569
9. Phasenregler	570

35. Kapitel.

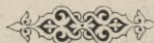
Verschiedene Schaltungsanordnungen für ein- und mehrphasigen Wechselstrom.

1. Ulbrichts System des einfachen Wechselstrombetriebes für Beleuchtungszwecke von Dreiphasenmaschinen aus	572
2. Das Mono- und Polyzyklische System von Ch. Pr. Steinmetz	574
3. Das polyzyklische System von Steinmetz	577
4. C. F. Scotts Umwandlung eines Zweiphasen- in ein Dreiphasensystem und umgekehrt	578
5. Das polyzyklische Stromverteilungssystem von Arnold-Bragstadt-la Cour	580
6. Das Verteilungssystem von Ferraris und Arnò	585

36. Kapitel.

Vorrichtungen zur Umwandlung von Wechselstrom in Gleichstrom.

1. Rotierende Umformer oder Konverter	588
2. Verteilung von Spannung und Strom bei einem Drehstrom-Gleichstromumwandler	592
3. Die Erwärmung des Ankers bei Umwandlern	595
4. Die Ankerrückwirkung	597
5. Die Kompoundierung der Umformer	598
6. Der Umwandler von Le Blanc	599
7. Pollaks Gleichrichter für Wechselstrom	601
8. Kochs Apparat zur Entnahme von Gleichstrom aus Wechselstromquellen	603
9. Die Quecksilberlampe als Gleichrichter für Wechsel- und Drehstrom	605
10. Grisson-Gleichrichter und -Umformer	607



GRUNDZÜGE
DER
WECHSELSTROM-TECHNIK.

1. Kapitel.

Allgemeine Bemerkungen über den Wechselstrom.

1. Wesen des Wechselstromes.

Wenn ein elektrischer Strom in regelmäßiger Folge, von der Stärke Null anfangend, allmählich nach einem bestimmten Gesetze bis zu einer gewissen Größe anwächst, dann allmählich wieder bis Null abnimmt und hierauf nach entgegengesetzter Richtung fließt, wiederum nach demselben Gesetze bis zu einer der vorigen gleichen, aber negativen Stärke anwächst und nach derselben Zeit in gleicher Weise wie vorher wieder aufs neue bis Null sinkt, und dieser Vorgang sich in gleichen Zeiten in genau derselben Weise regelmäßig wiederholt, so nennt man einen derartigen Strom einen »Wechselstrom«.

Die gleichen Zeiträume, nach deren Ablauf wir immer genau dieselbe Stärke und Richtung und die nämliche Wachstumstendenz des Stromes wiederfinden, heißen »Perioden«. Jede Periode zerfällt in zwei Teile, während der Strom einmal seine Richtung wechselt. Jede Periode umfaßt somit zwei Stromwechsel. Die Anzahl der Perioden, die in einer Sekunde stattfinden, nennt man die »Frequenz« des Stromes.

Bei den meisten Wechselströmen erfolgt das Anwachsen und die Abnahme des positiven Stromes nach demselben Gesetze wie das Wachstum und die Abnahme des entgegengesetzt gerichteten Stromes, und zumeist ist der negative Höchstwert dem positiven Maximum gleich. Es gibt jedoch auch Wechselströme, welche nicht aus zwei gleichen, nur entgegengesetzt gerichteten Teilen innerhalb einer Periode bestehen. In den nachfolgenden Betrachtungen werden wir uns jedoch zumeist auf solche Fälle beschränken, bei welchen diese beiden Hälften gleich und symmetrisch sind. Und in der Hauptsache, sofern nichts anderes besonders erwähnt wird, wollen wir voraussetzen, daß der Verlauf des Wechselstromes durch eine einfache Sinuslinie dargestellt werden kann, d. h. durch eine Wellenlinie, deren positive und negative Teile kongruent sind, und daß die Änderung nach dem Sinusgesetze stattfindet.

Wie wir schon an anderer Stelle (Grundzüge der Gleichstromtechnik, VIII, 4., S. 171, Formel 6) gezeigt haben, entsteht ein solcher Wechselstrom, wenn ein Leiter, z. B. eine Drahtspule, in einem gleichförmigen Kraftlinienfelde gedreht wird. Wir haben damals gezeigt, daß die in einer im gleichförmigen Magnetfelde rotierenden Spule erzeugte EMK dargestellt werden kann durch die Formel:

$$EMK = \frac{2 \pi u \cdot z}{60} \mathfrak{B} \cdot F \cdot \sin 2 \pi \frac{t}{T}$$

Hierin bedeutet u die Anzahl der Umdrehungen des Leiters in einer Minute, z die Anzahl der Windungen, welche in dem Magnetfelde gedreht werden, und F die Fläche, welche jede dieser Windungen umschließt. \mathfrak{B} ist die Feldstärke, d. h. die Anzahl von Kraftlinien,

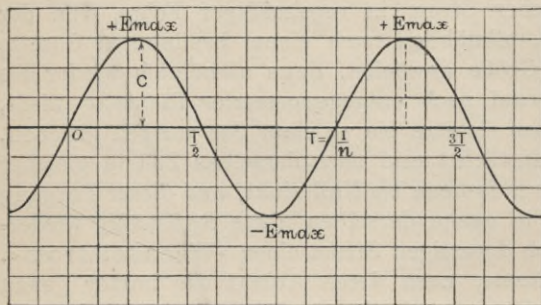


Fig. 1. Sinoidaler Verlauf einer Wechselspannung.

welche durch eine zur Richtung der Kraftlinien senkrechte Fläche von 1 qcm Inhalt hindurchgehen. Ferner ist t die Zeit, welche seit dem ersten Beginne der Drehung der Spule verflossen ist, und T die Dauer einer vollen Periode.

Ein solcher einfacher Verlauf einer EMK kann bildlich durch eine regelmäßige Wellenlinie, eine Sinoide, dargestellt werden. (Vergl. Fig. 1.)

Ist die Spule nicht in sich geschlossen, sondern sind die Enden derselben mit einem Widerstande verbunden, der so gut wie keine Selbstinduktion besitzt, z. B. mit einer Anzahl Glühlampen oder mit einem in engem Zickzack auf- und niedersteigenden Kupferstreifen, so entsteht in diesem Widerstande ein Wechselstrom, dessen Stromstärke fast genau denselben Verlauf zeigt, wie ihn die Wellenlinie aufweist, durch die wir die Änderung der EMK dargestellt haben.

Trägt man in irgend einem Maßstabe über derselben Geraden, durch die wir die Zeit graphisch dargestellt haben, als Ordinaten auch die Stromstärken auf, so erhält man in diesem Falle eine zweite Wellenlinie, die der Stromstärke, deren Gipfel und Täler genau senkrecht über oder unter den Gipfeln und Tälern der Wellenlinie liegen, durch die wir die zeitlichen Veränderungen der EMK veranschaulicht haben. Beide Wellen gehen dann genau gleichzeitig durch Null hindurch, nur die Höhe der Wellen ist je nach den für EMK und Stromstärke gewählten Maßeinheiten verschieden.

Wenn dagegen im äußern Widerstand Drahtspulen oder gar Elektromagnete enthalten sind, oder wenn der Strom durch ein längeres Kabel fortgeleitet wird, das merkliche Kapazität besitzt, so treten gewisse Veränderungen ein. Dann fallen die Wellengipfel und Wellentäler des in einem solchen Leiter erzeugten Stromes nicht mehr mit denen der EMK zusammen, die ihn veranlaßt; der Strom geht nicht zu demselben Zeitpunkte durch Null hindurch, zu der die EMK Null ist, nur die Frequenz, d. h. die Anzahl der Wellen, die innerhalb einer gewissen Länge der die Zeit darstellenden Abszissenlinie liegen, bleibt dieselbe. Der Strom besitzt dann gegen die EMK, die ihn hervorruft, einen Unterschied des Schwingungszustandes, den wir nach dem Sprachgebrauche der Wellenlehre mit dem Namen »Phasendifferenz« bezeichnen.

2. Praktische Bedeutung des Wechselstromes.

Die Fortleitung der menschlichen Sprache in Fernsprechanlagen erfolgt durch Wechselströme. Überall da, wo es sich um Energieübertragungen auf sehr große Entfernungen oder um Verteilung elektrischer Energie auf ausgedehnte Gebiete handelt, bedient man sich mit wirtschaftlichem Vorteil der Wechselströme.

Wenn elektrische Ströme auf lange Strecken fortgeleitet werden sollen, muß man mit sehr hohen Spannungen und geringen Stromstärken arbeiten, wenn man große Verluste in den Leitungen durch Stromwärme oder große Ausgaben für Leitungen von beträchtlichen Querschnitten vermeiden will.

Dynamomaschinen zur Erzeugung von Gleichstrom lassen sich nur schwer vollkommen betriebssicher für wesentlich höhere Spannungen als für 1000 Volt herstellen, nicht nur weil die Isolation der Drähte leicht Schaden leidet, sondern besonders weil dann die isolierenden Zwischenräume benachbarter Kollektorsegmente durch Lichtbogen überbrückt und dadurch die Maschine der Zerstörung preisgegeben werden kann.

Außerdem kann bei Gebrauch von Wechselströmen elektrische Energie von hoher und daher lebensgefährlicher Spannung, aber geringer Stromstärke ohne beträchtliche Verluste in Wechselstrom von niedriger Spannung und großer Stromstärke durch Transformatoren umgesetzt werden, die keinerlei bewegte Teile haben, während Gleichstrom nur durch Apparate transformiert werden kann, die, wie gewöhnliche Dynamomaschinen, rotierende Anker haben und daher der Beaufsichtigung und Schmierung bedürfen.

Auch bei den besten Gleichstrommaschinen, mögen sie als Stromerzeuger oder als Elektromotoren tätig sein, zeigen sich an den Stellen, an welchen die Stromabnehmer, die sogenannten Bürsten,

den Kollektor berühren, kleine Funken; in feuergefährlicher Umgebung können daher solche Maschinen nicht verwendet werden. Wechselstrommaschinen und -motoren können dagegen so konstruiert werden, daß an ihnen keine Stelle vorhanden ist, an welcher Funkenbildung stattfindet; man wird daher solche Apparate auch noch in Pulvermühlen und in Räumen, in welchen entzündliche Gase vorkommen, ohne Bedenken gebrauchen können.

Während man lange Zeit mit Recht gegen eine ausgedehnte Anwendung von Wechselströmen geltend machte, daß dieselben zur Arbeitsübertragung auf elektrischem Wege minder geeignet seien, weil die älteren Wechselstrommotoren nicht mit Belastung angehen wollten, bei Überlastung stehen blieben, besonderer durch Gleichstrom erzeugter Magnetfelder bedurften, und ihre Umlaufzahl nicht geregelt werden konnte, so sind diese Schwierigkeiten durch neuere Konstruktionen mit umlaufendem Magnetfelde völlig überwunden.

Auch die Gefährlichkeit von Strömen mit hoher Spannung fürchtet man nicht mehr, seitdem man gelernt hat, Wechselströme geringer Spannung zu erzeugen, die man zum Zwecke der Fortleitung auf weite Entfernungen durch verhältnismäßig dünne und daher billige Drähte in hochgespannte Ströme umsetzt und dann am Orte ihrer Bestimmung, ehe sie irgendwie verwendet werden, wiederum in ungefährliche Ströme von niedriger Spannung rückwärts umwandelt, ohne daß bei dieser wiederholten Verwandlung sehr große Verluste auftreten.

Bei Anwendung geeigneter Vorsichtsmaßregeln kann man aber auch ohne weiteres Wechselströme von vielen Tausenden von Volt Spannung erzeugen, diese Ströme an entfernt liegende Orte leiten und dort ohne Umwandlung zum Betriebe von Motoren unmittelbar verwenden.

Die einzige Einwendung von Wichtigkeit, die man noch immer mit Recht gegen den Gebrauch von Wechselströmen erheben kann, ist die Tatsache, daß man chemische Prozesse von praktischer Bedeutung nur mit Gleichstrom hervorbringen, daher auch nur mit Gleichstrom Akkumulatoren laden und elektrische Energie aufspeichern kann.

Aber auch nach dieser Richtung hin sind Erfolge von praktischer Bedeutung bereits erreicht worden. Es ist gelungen Vorrichtungen zu konstruieren, die den Wechselstrom in Gleichstrom umzuwandeln gestatten, ohne daß bei dieser Umsetzung übermäßig große Verluste entstehen. Es sind dies Gleichrichter und rotierende Umformer.

3. Summation von Wechselströmen und periodisch veränderlichen Spannungen.

Ganz in derselben Weise, wie man in der Wellenlehre Wellen zusammensetzen lernt, können auch zwei oder mehrere Wechselströme, die gleichzeitig durch einen Leiter fließen, vereinigt werden.

Denken wir uns z. B., daß wir auf einer geraden Linie die Zeiten als Abszissen und senkrecht dazu die zu den verschiedenen Zeiten stattfindenden Stromstärken oder die Spannungen eines Wechselstromes als Ordinaten auftragen, so erhalten wir als Bild der periodischen Veränderungen eine Wellenlinie, wie sie in Fig. 2 mit I bezeichnet ist.

Wird nun in demselben Leiter gleichzeitig ein zweiter Wechselstrom oder eine zweite periodisch veränderliche Spannung erzeugt, so wird diese durch eine zweite Wellenlinie II graphisch dargestellt.

Die beiden Wellenlinien können nun, indem man gleichgerichtete Ordinaten addiert, entgegengerichtete Ordinaten voneinander subtrahiert, zu einer einzigen neuen Wellenlinie III vereinigt werden.

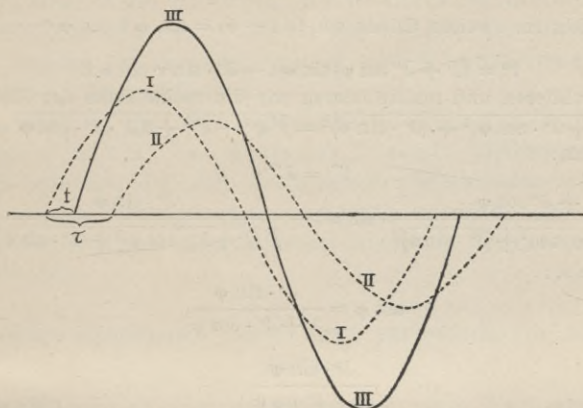


Fig. 2. Summation zweier periodischer Änderungen von gleicher Periode und verschiedener Phase.

Wenn, wie in der vorliegenden Abbildung, beide Wellenlinien eine gleiche Periode besitzen, so ist auch der neu entstehende Wellenzug III wiederum eine Sinuslinie. Wird z. B. die Wellenlinie I durch die Formel

$$i' = J' \cdot \sin 2\pi \frac{t}{T}$$

und die zweite Wellenlinie II durch die Formel

$$i'' = J'' \cdot \sin 2\pi \frac{t - \tau}{T}$$

dargestellt, wobei J' und J'' die Abstände der beiden Wellenscheitel von der Abszissenachse und τ die Zeit bezeichnet, um welche die Wellenlinie II später als I ihren positiven Höchstwert erreicht, so ergibt sich durch algebraische Addition:

$$i''' = i' + i'' = J' \cdot \sin 2\pi \frac{t}{T} + J'' \cdot \sin 2\pi \frac{t - \tau}{T}.$$

Es ist dann¹⁾

$$i''' = J''' \cdot \sin 2\pi \cdot \frac{t-t'}{T},$$

wenn man abkürzungsweise mit J''' die Scheitelhöhe der neu entstandenen Welle III und mit t' die Zeit bezeichnet, um welche die Welle III später die höchste Höhe erreicht, als die Welle I.

¹⁾ Der Beweis liegt in der folgenden einfachen Entwicklung:

Wir setzen in

$$i''' = J' \cdot \sin 2\pi \frac{t}{T} + J'' \cdot \sin \left(2\pi \frac{t}{T} - 2\pi \frac{\tau}{T} \right)$$

$$2\pi \cdot \frac{t}{T} = \omega t \text{ und } 2\pi \frac{\tau}{T} = \psi$$

und entwickeln im zweiten Gliede $\sin(\omega t - \psi) = \sin \omega t \cos \psi - \cos \omega t \sin \psi$.
Dann ist:

$$i''' = (J' + J'' \cos \psi) \sin \omega t - J'' \cdot \sin \psi \cos \omega t.$$

Nummehr dividieren und multiplizieren wir die rechte Seite der Gleichung mit

$$\sqrt{(J' + J'' \cos \psi)^2 + (J'' \sin \psi)^2} = \sqrt{J'^2 + J''^2 + 2J' \cdot J'' \cdot \cos \psi} = J''.$$

So erhält man:

$$i''' = J'''.$$

$$\cdot \left\{ \frac{J' + J'' \cos \psi}{\sqrt{(J' + J'' \cos \psi)^2 + (J'' \sin \psi)^2}} \cdot \sin \omega t - \frac{J'' \cdot \sin \psi}{\sqrt{(J' + J'' \cos \psi)^2 + (J'' \sin \psi)^2}} \cdot \cos \omega t \right\}$$

Setzt man jetzt:

$$\tan \varphi = \frac{J'' \cdot \sin \psi}{J' + J'' \cdot \cos \psi},$$

so ist

$$\sin \varphi = \frac{\tan \varphi}{\sqrt{1 + \tan^2 \varphi}} = \frac{\frac{J'' \cdot \sin \psi}{J' + J'' \cos \psi}}{\sqrt{\frac{(J'' \cdot \sin \psi)^2 + (J' + J'' \cos \psi)^2}{(J' + J'' \cos \psi)^2}}} = \frac{J'' \sin \psi}{\sqrt{(J' + J'' \cos \psi)^2 + (J'' \sin \psi)^2}}$$

und

$$\cos \varphi = \frac{1}{\sqrt{1 + \tan^2 \varphi}} = \frac{J' + J'' \cdot \cos \psi}{\sqrt{(J' + J'' \cos \psi)^2 + (J'' \sin \psi)^2}}$$

Demnach wird:

$$i''' = J''' \cdot \{ \cos \varphi \cdot \sin \omega t - \sin \varphi \cdot \cos \omega t \}$$

oder

$$i''' = J''' \cdot \sin(\omega t - \varphi)$$

und wenn man für ωt und φ die Werte wieder einsetzt:

$$i''' = J''' \cdot \sin \left(\frac{2\pi}{T} \cdot t - \arctan \frac{J'' \cdot \sin \psi}{J' + J'' \cdot \cos \psi} \right).$$

Wenn man nun $\arctan \frac{J'' \sin \psi}{J' + J'' \cdot \cos \psi} = \frac{2\pi}{T} t'$

setzt, erhält man die Formel:

$$i''' = J''' \cdot \sin \frac{2\pi}{T} (t - t').$$

Der Unterschied der Abszisse für die positiven Höchstwerte der drei Wellenlinien I, II, III heißt der Phasenunterschied. Derselbe ist zwischen I und III gleich t' , zwischen I und II gleich τ und zwischen III und II gleich $\tau - t'$.

Dieser Phasenunterschied kann sowohl in Zeit, als in Bruchteilen einer Wellenlänge, oder endlich in Winkelgraden, oder in Bogen für den Radius 1 ausgedrückt werden, wenn man die Länge einer Welle gleich 360° oder gleich 2π setzt. Da die Welle I zuerst ihr positives Maximum erreicht, sagt man, III und II seien gegen I in der Phase verzögert. In diesem Falle rechnet man den Phasenunterschied positiv und spricht von einer Phasenverzögerung.

Wenn aber Welle III früher ihr positives Maximum erreicht als die Welle II, so sagt man, III sei gegen II in der Phase verfrüht, oder III besitze im Vergleich mit II eine Phasenvoreilung oder eine negative Phasendifferenz.

Man erkennt, daß durch Summation (Superposition) der beiden Sinuslinien (I und II) von gleicher Periode wiederum eine Sinuslinie (III) entsteht, die aber bezüglich der Wellenhöhe wie der Phase von den beiden Komponenten wesentlich abweicht; in der Periode oder der Wellenlänge stimmt jedoch auch die Wellenlinie III mit I und II überein.

4. Andere graphische Darstellung periodisch veränderlicher Größen.

Statt die periodischen Veränderungen eines Wechselstromes oder der diesen Strom veranlassenden EMK durch eine Wellenlinie dar-

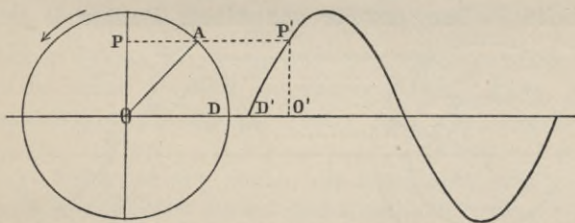


Fig. 3. Darstellung eines periodisch veränderlichen Vorganges durch ein Vektordiagramm. zustellen, kann man auch eine andere einfachere Art der graphischen Darstellung wählen.

Schlagen wir um den Punkt O (vergl. Fig. 3) einen Kreis mit einem Radius gleich der Entfernung des Gipfels des Wellenberges von der horizontalen Linie, die die Zeit darstellt, und ziehen einen Radius, z. B. $OA = J$, so verändert sich die Projektion OP dieses

Radius auf einen vertikalen Durchmesser genau in derselben Weise periodisch, wie die harmonisch veränderliche Größe i ,

$$i = J \cdot \sin 2 \pi \frac{t}{T}$$

wenn man den Radius in der Zeit T , der Dauer einer Periode, je einmal eine volle Umdrehung mit gleichförmiger Geschwindigkeit (entgegen der Richtung des Uhrzeigers) vollführen läßt, und wenn im Punkte D die Bewegung in dem Augenblicke beginnt, in dem der Wechselstrom oder die Wechselspannung in D' anfängt.

Die Vertikalprojektion von OA , d. i. die Strecke OP , ist gleich der Ordinate $O'P'$ der Sinuskurve und ändert sich wie diese.

Man erkennt sofort, daß

$$\omega = \frac{2 \pi}{T}$$

die Winkelgeschwindigkeit ist, mit der der Radius rotiert. Wie bei der Wellenlinie ist t die Zeit, die vom Anfange der Bewegung oder vom Nullwerte an verfllossen ist.

Man kann daher eine wie ein Sinus veränderliche Größe oder, was dasselbe ist, eine harmonisch veränderliche Größe in ihrem zur Zeit t stattfindenden Werte auch durch einen Radius OA (auch Vektor genannt) und einen darüber gezeichneten Pfeil, der die Bewegungsrichtung andeutet,¹⁾ darstellen. Diese Art der Darstellung führt den Namen »Vektordiagramm«.

5. Die Summation gleichartiger periodischer Veränderungen von gleicher Periode durch Vektordiagramm.

Für einen beliebigen Zeitpunkt t werden zwei zu summierende periodische Änderungen I und II von gleicher Periode durch die augenblickliche Stellung zweier von einem Punkte O ausgehender

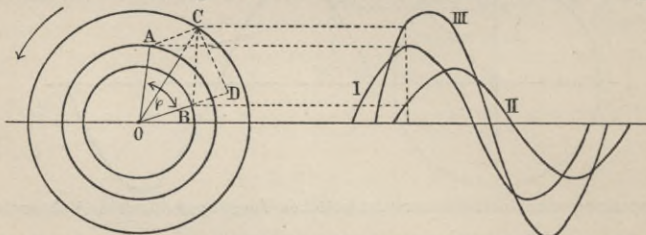


Fig. 4. Summation zweier periodisch veränderlicher Größen von gleicher Periode durch Vektordiagramm.

Vektoren OA und OB veranschaulicht, deren Vertikalprojektion den Schwingungszustand darstellt. (Vergl. Fig. 4.) Von der Größe des Winkels

$$BOA = \omega t - \varphi = \varphi$$

¹⁾ Welche Drehrichtung man wählt ist ganz gleichgiltig.

hängt alsdann der Unterschied im Schwingungszustand der beiden Bewegungen ab; dieser Winkel φ gibt den Phasenunterschied der beiden periodischen Änderungen I und II an.

Setzt man nun die beiden Vektoren \overline{OA} und \overline{OB} in derselben Weise zu einer Resultante \overline{OC} zusammen, wie dies bei dem Parallelogramm der Kräfte und der Bewegungen üblich ist, so gibt \overline{OC} nach Größe und Lage genau den Vektor, durch dessen Vertikalprojektion zu jeder Zeit die Summe der beiden periodischen Änderungen I und II dargestellt wird.

Es ist

$$\overline{OC} = \sqrt{\overline{OA}^2 + \overline{OB}^2 + 2 \overline{OA} \cdot \overline{OB} \cdot \cos \varphi}$$

und ebenso ergibt sich aus der Fig. 4:

$$\tan \text{COB} = \tan \Theta = \frac{\overline{CD}}{\overline{DO}} = \frac{\overline{OA} \cdot \sin \varphi}{\overline{OB} + \overline{OA} \cos \varphi}.$$

Man erkennt sofort, daß, wenn man mit \overline{OA} die Größe J' , mit \overline{OB} die Größe J'' und mit φ den Phasenunterschied der beiden zu summierenden Wechselströme bezeichnet, \overline{OC} den Höchstwert des durch die Addition entstandenen Wechselstromes III, d. h. die Größe J''' und Θ den Phasenunterschied des Stromes III und II darstellt.

Man erhält auf dem Wege der Konstruktion somit auf viel einfachere Weise dieselben Resultate, die sich in Absatz 3 auf dem Wege der Rechnung ergeben hatten. Für die Lösung praktischer Aufgaben der Wechselstromtechnik wird man sich daher vielfach mit Vorteil des graphischen Verfahrens, d. h. der Vektordiagramme bedienen.

6. Zusammensetzung

mehrerer sich periodisch ändernder Größen von gleicher Periode.

In derselben Weise, wie man zwei periodisch veränderliche Erscheinungen zu einer einzigen vereinigen kann, kann auch eine größere Anzahl summiert werden, sofern nur alle dieselbe Periode haben.

Man bildet zunächst aus zweien die Resultante, dann aus dieser Resultante und einer dritten wieder eine Resultante; diese neue Resultante vereinigt man nach dem Parallelogramm der Bewegungen mit einer vierten und fährt so fort, bis alle periodischen Veränderungen in einem einzigen Vektor vereinigt sind.

In der Fig. 5 sind beispielsweise vier periodische Änderungen \overline{OA} , \overline{OB} , \overline{OC} und \overline{OD} nach ihrer Größe und nach ihrem Phasenunterschied aufgezeichnet; dann wird in der oben angegebenen Weise zunächst aus \overline{OA} und \overline{OB} die Resultante \overline{OM} gebildet; diese Resultante

ist mit \overline{OC} zu einer neuen \overline{ON} und endlich diese neue mit \overline{OD} zur Gesamtresultante \overline{OR} vereinigt worden.

Dieselbe Konstruktion läßt sich auch einfacher ausführen (vergl. Fig. 6), wenn man an das Ende von \overline{OA} eine \overline{OB} gleiche und parallel gerichtete Strecke anträgt, an den nun erhaltenen Endpunkt eine Strecke, die \overline{OC} gleich ist und dieselbe Richtung wie diese besitzt; an den so erhaltenen Punkt fügt man alsdann nach Größe und Richtung \overline{OD} , so ist die Verbindung des zuletzt erhaltenen Punktes mit O nach

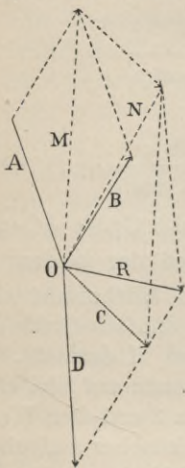


Fig. 5. Zusammensetzung mehrerer veränderlicher Größen von gleicher Periode.

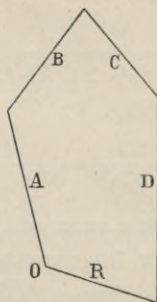


Fig. 6. Andere Art der Zusammensetzung mehrerer periodisch veränderlicher Größen.

Größe und Richtung gleich dem Vektor \overline{OR} , der resultierenden, periodisch veränderlichen Größe.

Dieses Verfahren kann auf beliebig viele Vektoren angewendet werden, und für das Endresultat ist es ganz gleichgültig, in welcher Reihenfolge die verschiedenen Komponenten zusammengesetzt werden.

Wir machen zum Schluß noch einmal darauf aufmerksam, daß diesen Methoden zwei Voraussetzungen zu Grunde liegen: Die zu summierenden periodischen Änderungen müssen gleiche Perioden haben, und die Änderung muß nach dem einfachen Sinusgesetz stattfinden. Sind diese Voraussetzungen erfüllt, so kann dieses Verfahren sowohl zur Zusammensetzung von periodisch veränderlichen elektromotorischen Kräften als zur Zusammensetzung von Wechselströmen und periodisch veränderlichen Kraftlinienfeldern verwendet werden.

Diese Konstruktionen können somit auf alle periodisch veränderlichen Größen von gleicher Periode angewendet werden, und wir werden weiterhin auf diese Weise sowohl EMKräfte, Wechselströme, als auch periodisch veränderliche Kraftlinienfelder zusammensetzen.

Für jeden, der aus den ersten Elementen der Mechanik mit dem Parallelogramm der Wege, der Geschwindigkeiten, der Kräfte bekannt ist, bedarf es kaum der Erwähnung, daß man ebenso periodisch veränderliche EMKräfte, Ströme und Kraftlinienfelder in Komponenten zerlegen kann. Auch von solchen Zerlegungen wird in den folgenden Darlegungen öfters Gebrauch gemacht werden.

7. Die Mittelwerte periodisch veränderlicher Erscheinungen.

Da bei den in der Praxis vorkommenden Wechselströmen die Änderung der EMK sowohl als der Stromstärken und der erzeugten Kraftlinienfelder sehr rasch vor sich geht, sind wir im allgemeinen nicht imstande, die in jedem Augenblick auftretenden Werte durch die Beobachtung wahrzunehmen. Wir müssen uns daher mit Durchschnittswerten begnügen.

Wenn man in einer halben Periode den mittleren Betrag einer nach einer Sinusfunktion sich ändernden Größe bilden will, so hat man das Rechteck über der halben Wellenlänge zu suchen, dessen Flächeninhalt gleich dem von der halben Sinoide und der Nulllinie eingeschlossenen Fläche ist. Die Höhe dieses Rechteckes, der mittlere Wert, ist gleich dem Produkte aus $\frac{2}{\pi}$ mit dem Maximalwerte.

Ist z. B. E_{\max} der Maximalwert der EMK, so ist der algebraische Mittelwert e_m

$$e_m = \frac{2}{\pi} \cdot E_{\max} = 0,637 E_{\max}.$$

Der einfache algebraische Mittelwert kommt bei Stromstärke und Spannung eines Wechselstromes jedoch nur sehr selten in Betracht.

Für eine ganze Wellenlänge liegt das eine Rechteck über und das andere, kongruente Rechteck unter der Nulllinie. Der Mittelwert einer harmonisch veränderlichen Größe für eine ganze Wellenlänge oder für ganze Vielfache derselben ist daher Null. (Vergl. Fig. 7).

Wir messen die Spannung oder Stromstärke von Wechselströmen entweder durch die Wärmeentwicklung, welche ein Wechselstrom hervorbringt, oder wir bedienen uns des Elektrodynamometers. In beiden Fällen hängt die gemessene Wirkung nicht von der veränderlichen Größe selbst, sondern von dem Quadrate derselben ab. (Vergl. Gleichstrom II, 1., S. 33 und VII, 2., S. 157.)

Die Wärmewirkung eines Stromes ist bekanntlich nach dem Jouleschen Gesetz dem Quadrate der Stromstärke proportional, und ebenso ist die abstoßende oder anziehende Kraft, welche die feste Windung eines Elektrodynamometers auf die bewegliche Windung ausübt, dem Quadrate der Stromstärke proportional, da ja beide Windungen von demselben Strome durchflossen werden.

Wir verstehen daher unter effektiver Stärke eines zu messenden Wechselstromes denjenigen quadratischen Mittelwert, der auf ein

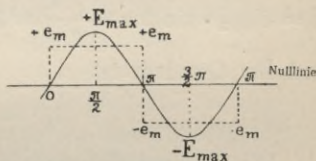


Fig. 7. Mittelwert einer nach einer Sinusfunktion sich ändernden Größe.

Hitzdrahtvoltmeter oder ein Elektrodynamometer dieselbe Wirkung, denselben Effekt hervorbringt, wie ein Gleichstrom von einer bestimmten Spannung oder einer bestimmten Stromstärke.

Wir wollen die Größe dieses quadratischen Mittelwertes einer nach einer Sinusfunktion veränderlichen elektrischen Erscheinung jetzt zu bestimmen suchen.

Betrachten wir zu irgend einem Zeitpunkte t z. B. die Stärke eines Wechselstromes, so ist dieser Strom

$$i = J_{\max} \cdot \sin 2\pi \frac{t}{T} \dots \dots \dots 1)$$

wenn wir mit J_{\max} den Höchstwert und mit T die Zeitdauer einer vollen Periode bezeichnen,¹⁾ und das Quadrat dieser Ordinate der Wellenlinie ist

$$i^2 = J_{\max}^2 \cdot \sin^2 2\pi \frac{t}{T}.$$

Betrachten wir nun denselben Strom noch ein zweites Mal, zu einem Zeitpunkte, der um ein Viertel der Zeitdauer einer vollen Periode, also um den Zeitwert $\frac{T}{4}$ zurück liegt, also die Stromstärke zur Zeit

$t - \frac{T}{4}$, so ist diese Stromstärke i_1

$$i_1 = J_{\max} \cdot \sin 2\pi \frac{t - \frac{T}{4}}{T} = J_{\max} \cdot \sin \left(2\pi \frac{t}{T} - \frac{\pi}{2} \right) = -J_{\max} \cdot \cos 2\pi \frac{t}{T}$$

und ihr Quadrat ist

$$i_1^2 = J_{\max}^2 \cdot \cos^2 2\pi \frac{t}{T} \dots \dots \dots 2)$$

Die Summe dieser beiden Quadrate ist:

$$i^2 + i_1^2 = J_{\max}^2 \dots \dots \dots 3)$$

Die Summe der Quadrate der beiden um eine Viertelperiode voneinander verschiedenen Ströme ist also stets gleich groß, nämlich gleich J_{\max}^2 . Demnach muß auch der Mittelwert dieser Summe, über die Dauer einer vollen Periode genommen, ebenfalls gleich J_{\max}^2 sein.

Wenn wir diese Summe für alle Punktpaare innerhalb der ganzen Dauer einer vollen Periode T gebildet haben, so haben wir auf der linken Seite die Summe der Quadrate aller innerhalb einer vollen

¹⁾ Mit J_{\max} , E_{\max} bezeichnen wir im allgemeinen die Höchstwerte der Stromstärke oder EMK, die in einer vollen Periode vorkommen, mit i und e die zu einem bestimmten Zeitpunkt t auftretenden Momentanwerte und mit i_{eff} oder J und e_{eff} oder E die effektiven Mittelwerte der Stromstärke und der EMK eines Wechselstromes.

Periode stattfindenden Stromstärken zweimal gebildet, weil innerhalb einer ganzen Periode sowohl i als i_1 alle möglichen Werte durchlaufen hat. Nennen wir also diesen quadratischen Mittelwert i_{eff} , so ist i_{eff}^2 gleich dem halben quadratischen Mittelwert der Stromstärke i , und folglich

$$2 \cdot i_{\text{eff}}^2 = J_{\text{max}}^2$$

$$i_{\text{eff}} = \frac{J_{\text{max}}}{\sqrt{2}} = 0,707 J_{\text{max}} \dots \dots \dots 4)$$

Die effektive Stromstärke eines Wechselstromes ist also nur nahezu $\frac{7}{10}$ von dem Höchstwert, den der Strom während seiner Änderung erreicht.

Ebenso ist die effektive Spannung, die durch ein Hitzdrahtvoltmeter gemessen wird,

$$e_{\text{eff}} = \frac{E_{\text{max}}}{\sqrt{2}} = 0,707 E_{\text{max}} \dots \dots \dots 5)$$

Haben wir es mit einem nach einer Sinusfunktion periodisch veränderlichen Kraftlinienfeld zu tun, dessen Maximalwert Φ_{max} ist, so wird das effektive Feld

$$\Phi = 0,707 \Phi_{\text{max}} \dots \dots \dots 6)$$

8. Der Formfaktor und der Scheitelfaktor.

Wenn wir in den nachfolgenden Betrachtungen auch meist von der vereinfachenden Voraussetzung ausgehen, daß der zeitliche Verlauf eines Wechselstromes oder einer Wechselspannung nach dem Sinusgesetze verläuft, graphisch somit durch eine Sinoide dargestellt werden kann, so ist dies in der Praxis doch tatsächlich niemals der Fall. Die Mittelwerte haben aber nur in dem von uns vorausgesetzten Falle des sinoidalen Verlaufes die angegebenen Werte.

Das Verhältnis des einfachen algebraischen Mittelwertes $M(i_t)$ zum effektiven Werte $\sqrt{M(i_t^2)}$, also die Größe:

$$\frac{M(i_t)}{\sqrt{M(i_t^2)}} = c \dots \dots \dots 7)$$

ist für die Gestalt der Stromkurve charakteristisch und wird daher Formfaktor genannt.

Das Verhältnis des effektiven Wertes zum Maximalwerte, also der Quotient:

$$\frac{\sqrt{M(i_t^2)}}{J_{\text{max}}} = K \dots \dots \dots 8)$$

führt den Namen Scheitelfaktor.

Hätten wir beispielsweise eine Stromkurve, die durch ein Dreieck (Fig. 8) dargestellt würde (ein Verlauf des Stromes, der selbstverständlich in der Praxis so gut wie nie vorkommen wird), und sei die

Basis des Dreieckes $\left(\frac{T}{2}\right) = a$, die Maximalstromstärke aber $J_{\max} = b$,
so wäre der einfache Mittelwert $M(i_t) = \frac{b}{2}$. Der effektive Mittel-

wert $\sqrt{M(i_t^2)}$ aber ist $\frac{b}{\sqrt{3}}$. Der Formfaktor c und Scheitelfaktor K für
einen Verlauf des Wechselstromes in einer Zickzacklinie wäre somit:

$$c = \frac{\frac{b}{2}}{\frac{b}{\sqrt{3}}} = \frac{1}{2} \sqrt{3} = 0,87, \quad K = \frac{b}{\frac{b}{\sqrt{3}}} = \frac{1}{\sqrt{3}} = 0,57 \dots \quad 9)$$

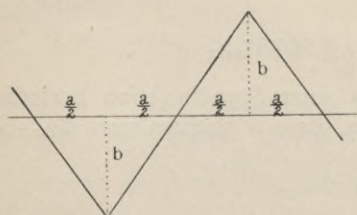


Fig. 8. Wechselstrom mit dreieckiger Stromkurve.

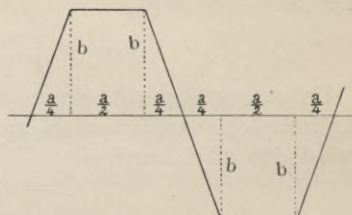


Fig. 9. Wechselstrom mit trapezförmiger Stromkurve.

Entspräche dagegen der Verlauf des Wechselstromes einem Trapez,
wie es obenstehende Fig. 9 darstellt, so ist der einfache algebraische
Mittelwert:

$$M(i_t) = \frac{\frac{b}{2} + b}{2} = \frac{3}{4} b.$$

Der quadratische Mittelwert aber ist:

$$M(i_t) = \frac{\frac{b^2}{3} + b^2}{2} = \frac{2}{3} b^2.$$

Die effektive Stromstärke wäre somit: $\sqrt{M(i_t^2)} = b \sqrt{\frac{2}{3}}$.

Bei der angenommenen trapezoidischen Gestalt der Stromkurve

hat der Formfaktor den Wert $c = \frac{\frac{3}{4} b}{b \sqrt{\frac{2}{3}}} = \frac{3 \sqrt{3}}{4 \sqrt{2}} = 0,919$,

der Scheitelfaktor $k = \frac{b \sqrt{\frac{2}{3}}}{b} = \sqrt{\frac{2}{3}} = 0,81 \dots \quad 10)$

Für den zumeist vorausgesetzten sinoidalen Verlauf war der
einfache Mittelwert $M(i_t) = \frac{2}{\pi} \cdot J_{\max} = 0,637 J_{\max}$ und der effektive

Mittelwert $\sqrt{M(i_t^2)} = \frac{J_{\max}}{\sqrt{2}} = 0,707 \cdot J_{\max}$.

Im Fall, daß die Stromkurve eine Sinoide ist, gelten somit folgende Werte:

$$\text{Formfaktor } c = \frac{\frac{2}{\pi} \cdot J_{\max}}{\frac{1}{\sqrt{2}} J_{\max}} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} = 0,9,$$

$$\text{Scheitelfaktor } k = \frac{1}{\frac{1}{\sqrt{2}} \cdot J_{\max}} = \frac{1}{\sqrt{2}} = 0,707 \quad . \quad 11)$$

Das Verhältnis des einfachen Mittelwertes zum Maximalwert hat bis jetzt keinen Namen erhalten, weil es bei der Beurteilung praktischer Fragen selten oder nie in Betracht kommt.

9. Bestimmungen der effektiven Arbeit eines Wechselstromes.

Wir haben früher (Gleichstromtechnik, Kapitel II, 3, S. 35, Gleichung 3) gezeigt, daß bei einem Gleichstrom die Arbeitsleistung in der Zeiteinheit gleich dem Produkte aus der Stromstärke i und der Spannung e , also gleich dem Werte $i \times e$ ist. Wenn nun, wie dies in der Praxis fast stets der Fall ist, die beiden Wellenlinien, von denen die eine die Stromstärke, die andere die gleichzeitige EMK darstellt, nicht zu gleicher Zeit ihre Gipfel erreichen und nicht gleichzeitig durch Null hindurchgehen, wenn also Stromstärke und EMK zwar gleiche Periode haben, aber zwischen ihnen eine Phasendifferenz besteht, so ist die Bestimmung des effektiven Mittelwertes dieses veränderlichen Produktes zweier periodisch veränderlicher Größen i und e nur auf Grund besonderer Betrachtungen möglich.

Wir stellen uns die periodisch nach einer Sinusfunktion veränderliche EMK e durch einen von O ausgehenden Vektor OE dar, dessen Länge in irgend einer Maßeinheit gleich der höchsten Zahl der Volt, gleich E_{\max} ist, die von der Spannung dann erreicht wird, wenn die Wellenlinie der Spannung ihren Wellengipfel erreicht. Ebenso stellen wir in einem anderen passenden Maßstab die veränderliche Stromstärke ebenfalls durch einen von O ausgehenden Vektor OJ dar. Den Winkel φ , den OJ und OE miteinander einschließen, wählen wir so, daß er gerade der Phasendifferenz entspricht, welche die Welle, die den Verlauf des Stromes darstellt, gegen die Welle der EMK aufweist. (Vergl. Fig. 10).

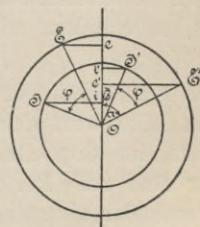


Fig. 10.
Ermittlung der Arbeit
eines Wechselstromes.

Nehmen wir die Drehrichtung der Vektoren entgegengesetzt der Bewegung des Uhrzeigers an, so ist in dem in der Fig. 10 gezeichneten

Beispiele die Wechselfspannung gegen die Stromstärke um die Phasendifferenz φ verzögert.

Die Projektion des Vektors OJ auf die vertikale Y-Achse stellt dann die augenblickliche Stromstärke i

$$i = \overline{OJ} \cdot \sin \beta$$

dar, und die Projektion des Vektors OE auf dieselbe Achse ist die gleichzeitig stattfindende Spannung e

$$e = \overline{OE} \cdot \sin \alpha.$$

Um den effektiven mittleren Wert der Arbeit A, des Produktes

$$e \cdot i = \overline{OE} \cdot \sin \alpha \cdot \overline{OJ} \cdot \sin \beta$$

innerhalb einer vollen Periode zu finden, wenden wir denselben Kunstgriff an, der uns im vorigen Paragraphen zum Ziele geführt hat.

Wir betrachten nämlich außerdem die Werte der Stromstärke, der Spannung und der elektrischen Arbeit, die eine Viertelperiode später stattfinden. Da eine ganze Periode einer vollen Umdrehung jedes der beiden Vektoren entspricht, so stehen der Vektor $\overline{OJ'}$ auf \overline{OJ} und ebenso der Vektor $\overline{OE'}$ auf \overline{OE} senkrecht. Zu diesem eine Viertelperiode später liegenden Zeitpunkte ist die Stromstärke i'

$$i' = \overline{OJ'} \cdot \sin (\beta + 90) = \overline{OJ} \cdot \cos \beta$$

und der gleichzeitige Wert der Spannung e' ist:

$$e' = \overline{OE'} \cdot \sin (\alpha + 90) = \overline{OE} \cdot \cos \alpha.$$

Der Momentanwert a der elektrischen Arbeit in diesem Augenblicke ist:

$$a = i' \cdot e' = \overline{OJ} \cdot \cos \beta \cdot \overline{OE} \cdot \cos \alpha \quad . \quad . \quad . \quad 12)$$

Bilden wir jetzt die Summe der Arbeiten, die zu den beiden um eine Viertelperiode verschiedenen Zeitmomenten stattfinden, so ist dieselbe:

$$i \cdot e + i' \cdot e' = \overline{OJ} \cdot \overline{OE} \cdot \sin \alpha \cdot \sin \beta + \overline{OJ} \cdot \overline{OE} \cdot \cos \alpha \cdot \cos \beta = \overline{OJ} \cdot \overline{OE} \cdot \{ \sin \alpha \cdot \sin \beta + \cos \alpha \cdot \cos \beta \} = \overline{OJ} \cdot \overline{OE} \cos (\alpha - \beta) \quad 13)$$

Da nun aber

$$\alpha - \beta = \varphi$$

die Phasendifferenz zwischen der Stromwelle und der Spannungswelle ist, so erhalten wir:

$$i \cdot e + i' \cdot e' = \overline{OJ} \cdot \overline{OE} \cdot \cos \varphi.$$

Die rechte Seite dieser Gleichung ist unveränderlich. Bilden wir nun den Mittelwert der Summe über eine volle Periode, so erhalten wir links den doppelten Betrag des Mittelwertes a_{eff} der Arbeitsleistung für eine volle Periode und finden, daß derselbe dem unveränderlichen Werte der rechten Seite gleich ist,

$$2 a_{\text{eff}} = \overline{OJ} \cdot \overline{OE} \cdot \cos \varphi$$

oder

$$a_{\text{eff}} = \frac{\overline{OJ} \cdot \overline{OE} \cdot \cos \varphi}{2} = \frac{\overline{OJ}}{\sqrt{2}} \cdot \frac{\overline{OE}}{\sqrt{2}} \cdot \cos \varphi.$$

Da nun aber $\frac{OJ}{\sqrt{2}} = i_{\text{eff}}$ der effektive oder quadratische Mittelwert der Stromstärke, und $\frac{OE}{\sqrt{2}} = e_{\text{eff}}$ derselbe Mittelwert der periodisch veränderlichen EMK oder Spannung ist, so ergibt sich schließlich, daß der Mittelwert der Arbeitsleistung eines Wechselstromes

$$a_{\text{eff}} = i_{\text{eff}} \cdot e_{\text{eff}} \cos \varphi \quad 14)$$

ist.

Die mittlere Arbeitsleistung eines Wechselstromes ist somit gleich dem Produkte aus der effektiven Stromstärke, der effektiven Spannung

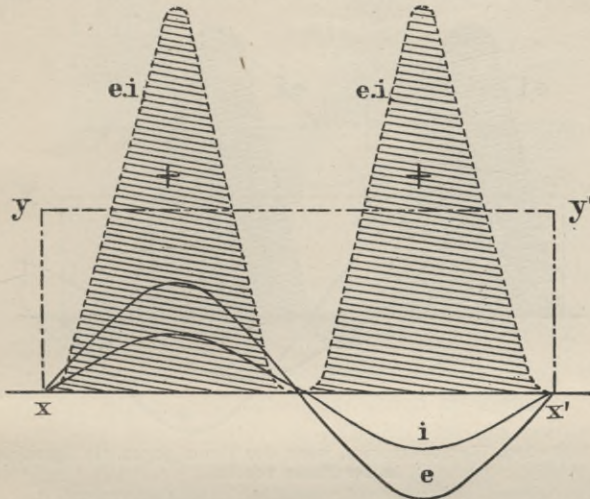


Fig. 11. Arbeit eines Wechselstromes, dessen Stromstärke und Spannung gleiche Phase haben.

und dem Cosinus der Phasendifferenz der Stromwelle und der Spannungswelle.

Der Faktor $\cos \varphi$, mit dem das Produkt aus der effektiven Spannung und der effektiven Stromstärke eines Wechselstromes multipliziert werden muß, um die effektive Arbeit dieses Stromes oder eines Wechselstromapparates zu erhalten, nennt man den »Leistungsfaktor«.

In vorstehender Fig. 11 sind beispielsweise die Stromwelle (i), die Spannungswelle (e) und der Verlauf der Arbeitsgrößen (e · i) während der Dauer einer Periode graphisch dargestellt, und zwar in dem speziellen Falle, daß zwischen dem Strom und der EMK des Wechselstromes keine Phasendifferenz vorliegt, daß der Phasenverschiebungswinkel φ also den Wert Null hat. *(also $\cos \varphi = 1$).*

Der Flächeninhalt der schraffierten Kurve, deren einzelne Ordinaten für jeden Moment die Größe der Arbeit $e \cdot i$ angeben, ist die effektive Arbeit, die während einer vollen Periode geleistet wird. Das Rechteck $xy y'x'$ stellt diesen Arbeitswert ebenfalls dar.

Man sieht, daß im Verlaufe einer vollen Periode die Arbeit veränderlich ist und im vorliegenden Falle aus zwei Wellen besteht, die sich in positiver Richtung über die Abszissenachse erheben.

Bei einem Strome, bei dem EMK und Stromstärke in gleicher Phase sind, wird somit nur positive Arbeit geleistet.

Anders ist es bei dem in Fig. 12 aufgezeichneten Beispiele. Hier ist die dicker gezeichnete Stromkurve in der Phase verfrüht gegen

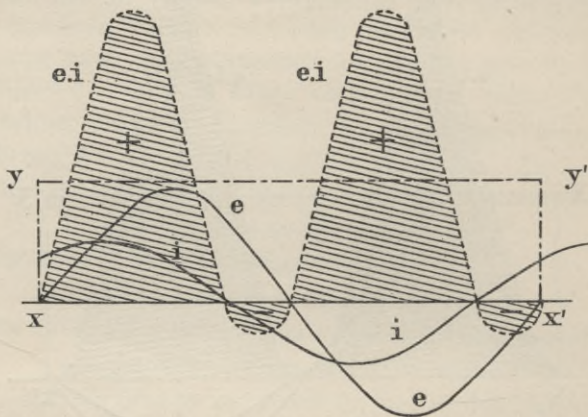


Fig. 12. Arbeit eines Wechselstromes, wenn der Strom gegen die Spannung um 45° in der Phase voreilt.

die EMK (und zwar ist $\varphi = -45^\circ$). Die EMK erreicht z. B. ihren Höchstwert E zu einem Zeitpunkte, zu dem der Wert i bereits erheblich unter seinen Maximalwert gesunken ist. In diesem Falle besteht die durch die schraffierte Fläche dargestellte Arbeit aus vier Teilen, von denen zwei mit $+$ bezeichnete über der Abszissenachse, zwei mit $-$ bezeichnete unter der Abszissenachse liegen. Die effektive Arbeit, deren Betrag wieder durch das Rechteck $xy y'x'$ dargestellt wird, ist dann die Differenz der über und der unter der Linie xx' liegenden Flächenstücke. Wären die Sinuskurven der Stromstärke und der Spannung nicht gegeneinander in der Phase verschoben, so wären negative Werte der Leistungskurve nicht möglich.

Besonders bemerkenswert ist der Umstand, daß für den besonderen Fall $\varphi = 90^\circ$ der Wechselstrom gar keine Arbeitsleistung besitzt. Dies tritt ein, wenn die Spannung und die Stromstärke einen Phasenunterschied von 90° , d. h. von einer Viertelwellenlänge haben, sich

zueinander in Quadratur befinden. Man spricht dann von einem »wattlosen Strome«.

Die Fig. 13 stellt diesen Fall dar. Der Strom ist gegen die EMK um eine volle Viertelperiode verfrüht. Man ersieht aus der Figur, daß dann die Arbeit aus vier kongruenten Teilen besteht, von denen zwei über, zwei unter der Abszissenachse liegen. Die algebraische Summe dieser Größen ist alsdann gleich Null.

Ein solcher wattloser Strom würde z. B. der Erregerstrom eines mit Selbstinduktion behafteten Apparates sein, weil er gegen-

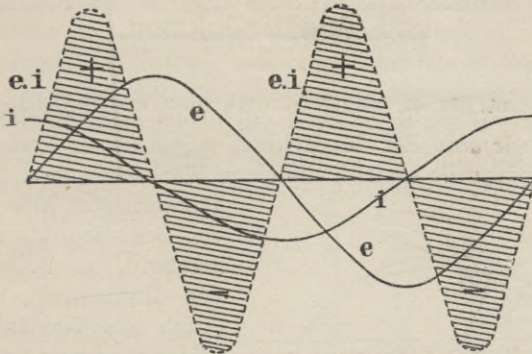


Fig. 13. Arbeit eines Wechselstromes, bei dem der Strom gegen die Spannung um 90° in der Phase voreilt.

über der induzierenden EMK eine Phasenverschiebung von 90° besitzt. Auch der Strom, der scheinbar einen in einem Wechselstromkreis befindlichen Kondensator durchfließt, ist ein wattloser Strom. Auch er besitzt eine Phasenverschiebung von 90° gegen die EMK, aber in entgegengesetztem Sinne der durch Selbstinduktion erzeugten Phasenverschiebung. Der Energiestrom einer Selbstinduktion bleibt gegen die EMK um 90° zurück, der Kondensatorstrom eilt der EMK um 90° voran.

Da ein wattloser Strom keine Aufwendung an elektrischer Arbeit erfordert, bringt er auch keine Erwärmung hervor und bedarf zu seiner Erzeugung keiner Arbeitsleistung.

2. Kapitel.

Wechselstromkreise mit Widerstand und Selbstinduktion.

1. Wechselstrom in einem Stromkreise mit Selbstinduktion.

Denken wir uns der Einfachheit wegen einen Stromkreis, der aus einer Stromquelle besteht, die einen Wechselstrom erzeugt; dieser Wechselstrom fließe durch einen von Selbstinduktion freien Widerstand, z. B. eine Anzahl von Glühlampen, und hierauf durch eine Vorrichtung, deren Widerstand vernachlässigt werden kann, die aber eine erhebliche Selbstinduktion besitzt, etwa durch die Windungen eines Elektromagneten.

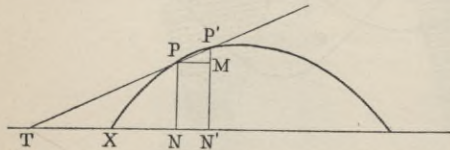


Fig. 14. Periodisch sich ändernde Kraftlinienzahl.

Den gesamten Widerstand des Stromkreises, der sich geltend machen würde, wenn derselbe von einem Gleichstrom durchflossen würde, bezeichnen wir mit w .

Dadurch, daß der Wechselstrom die Spule des Elektromagneten durchfließt, werden in dem Eisenkern der Spule Kraftlinien erzeugt; jede Änderung der Kraftlinienzahl erzeugt aber infolge der Induktionswirkung eine EMK, die genau der Änderung der Kraftlinienzahl, bezogen auf die Zeiteinheit, gleich ist.¹⁾ Nehmen wir z. B. an, die Anzahl der vom Wechselstrom zu verschiedenen Zeiten erzeugten Kraftlinien werde durch die Wellenlinie (Fig. 14) dargestellt, alsdann wird die Änderung der Kraftlinienzahl, bezogen auf die Zeiteinheit, ausgedrückt durch die trigonometrische Tangente des Winkels, den die Tangente an die Kurve mit der Abszissenachse oder der Linie macht, auf die wir die Zeiten abgetragen haben. Während die Zeit von N bis N' um den kleinen Betrag $NN' = \Delta$ wächst, nimmt die Anzahl der Kraftlinien um MP' zu. Die gesuchte, auf die Zeiteinheit bezogene

¹⁾ Man vergl. Gleichstromtechnik, Kap. VIII, S. 166 u. s. f.

Änderung der Kraftlinienzahl, die gleich der durch diese Änderung hervorgerufenen EMK e_s ist, findet sich aus der Proportion:

$$\Delta : 1 = \overline{MP'} : e_s$$

oder
$$e_s = \frac{\overline{MP'}}{\Delta} = \tan MPP'.$$

Liegen sich aber die beiden Punkte P und P' genügend nahe, so kann ohne merklichen Fehler die geometrische Tangente im Punkte P an die Kurve mit der Sehne PP' vertauscht werden.

Der Winkel MPP' erreicht sichtlich seine höchsten Werte, wenn der Punkt P an den Stellen der Kurve gewählt wird, an denen die Wellenlinie durch die Nulllinie hindurchgeht. Der Winkel MPP' und somit auch seine trigonometrische Tangente sind dagegen Null, wenn der Punkt P auf einem Gipfel der Welle oder auf der tiefsten Stelle des Wellentales gewählt wird.

Die Kurve, durch die man die induzierte EMK darstellen kann, ist somit wieder eine Wellenlinie, aber die Gipfel dieser Wellenlinie liegen da, wo die

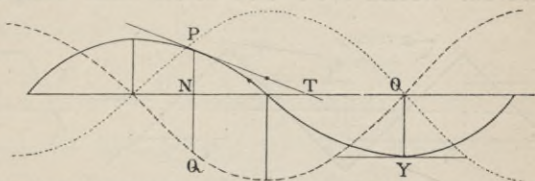


Fig. 15. Gleichzeitige Änderung der Kraftlinienzahl und der induzierten EMK.

Kurve, durch die wir die Kraftlinienzahl zu verschiedenen Zeiten dargestellt haben, durch Null hindurchgeht, während die abgeleitete Kurve der induzierten EMK zu der Zeit durch Null hindurchgeht, zu der die Kraftlinienkurve ihre Wellengipfel oder die tiefsten Stellen der Wellentäler erreicht.

Die Kurven, durch die man die in den Windungen des Elektromagneten induzierten EMK darstellen könnte, besitzen also gegen die Kurven der Kraftlinienzahl eine Phasendifferenz, die einem Unterschiede von einer Viertelwelle oder einer Viertelperiode entsprechen würden.

Da bekanntlich die induzierte EMK in dem Sinne wirkt, daß sie den alten Zustand zu erhalten, also die Änderung zu hindern sucht, so hat sie in jedem Momente ein der Änderung entgegengesetztes Vorzeichen. Die Wellenlinie der induzierten EMK wird daher um eine Viertelwellenlänge oder eine Viertelperiode hinter der Wellenlinie der Kraftlinie zurückbleiben; sie erscheint in der graphischen Darstellung nach rechts um eine Viertelwellenlänge oder zeitlich um eine Viertelperiode verschoben.

In Fig. 15 stellt die ausgezogene Linie die periodisch wechselnde Kraftlinienzahl, die gestrichelte Linie die jeweilige Änderung der Kraftlinienzahl und die punktierte Linie die induzierte EMK als Funktion der Zeit dar.

Nur wenn die Änderung der Kraftlinienzahl (proportional der Stromstärke $i_t = I_{\max} \cdot \sin \omega \cdot t$) nach einer Sinusfunktion der Zeit erfolgt, ändert sich auch die induzierte EMK nach einer Sinusfunktion der Zeit.

Wäre der Verlauf des magnetisierenden Stromes z. B. eine Zickzacklinie, wie in Fig. 16, so würde die induzierte EMK sich nach einer aus Rechtecken zusammengesetzten Linie ändern.

Erfolgte jedoch die Änderung des magnetisierenden Stromes nach einer aus kongruenten Trapezen zusammengesetzten Linie (vergl. Fig. 17), so würde die induzierte EMK einen treppenartigen Verlauf zeigen. Stets aber, so auch hier in allen drei behandelten Fällen, eilt die der Änderung der Stromstärke proportionale induzierte EMK der Stromkurve um eine Viertelperiode (90°) voraus.

Da z. B. im Punkte P (Fig. 15) die Kraftlinienzahl abnimmt, ist der Winkel NTP und somit seine Tangente negativ. Die Ordi-



Fig. 16. Stromkurve und Kurve der induzierten EMK.

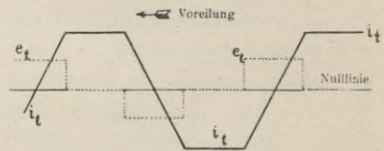


Fig. 17. Stromkurve und Kurve der induzierten EMK.

nate NQ, die den Wert der trigonometrischen Tangente des Winkels NTP darstellt, ist daher nach unten gerichtet. Die gestrichelte Wellenlinie erreicht ihren negativen Maximalwert, wenn die Kraftlinienkurve durch die Abszissenachse hindurchgeht. Die induzierte EMK ist Null (z. B. bei O), wenn (bei Y in der Figur) die Feldstärke ihren höchsten negativen Wert überschreitet.

Es fragt sich nun zunächst, was für eine Kurve die in der Figur ausgezogene Linie sein wird, durch die man die Änderung der Kraftlinienzahl darstellen kann. Die Verschiedenheit der Kraftlinienzahl im Kerne des Elektromagneten hat ihre Ursache in dem Wechselstrom, den wir durch die Windungen senden. Wir wissen aber, daß die von einem die Windungen durchfließenden Strome im Eisenkerne erzeugte Kraftlinienzahl abhängig ist von der Stromstärke, von der Windungszahl und der Permeabilität des Eisens.¹⁾

Die in jedem Zeitmomente im Kerne erzeugte Kraftlinienzahl würde der jeweiligen Stromstärke sogar streng proportional sein, wenn die Permeabilität konstant wäre. Dies ist aber bekanntlich nur für sehr geringe Kraftliniendichten (etwa bis 4000 Kraftlinien

¹⁾ Gleichstromtechnik, Kap. VI, 4., S. 129.

für 1 *qcm* Querschnitt) bei besonders vorzüglichen Eisensorten annähernd der Fall, für höhere Kraftliniendichten nimmt die Permeabilität bekanntlich ab. (Vergl. Gleichstromtechnik Fig. 49, S. 116.)

Die Kurve der Kraftlinienzahl wird daher nicht genau nach denselben Gesetzen sich ändern, wie die nach einer Sinusfunktion veränderliche Stromstärke des Wechselstromes, aber es wird in einer ersten rohen Annäherung gestattet sein, anzunehmen, daß auch die Änderung der Kraftlinienzahl nach einer Sinusfunktion erfolge, da bei Wechselstromapparaten meist nur mit geringen Kraftliniendichten gearbeitet wird, und nur bestes Eisenblech Verwendung findet oder wenigstens benutzt werden soll. Setzen wir also voraus, daß die Änderung der Kraftlinienzahl nach einer Sinusfunktion erfolgt, so ist in Fig. 15

$$\overline{NP} = \Phi \cdot \sin 2\pi \frac{t}{T} = \Phi \cdot \sin \omega t \quad 1)$$

und
$$\overline{N'P'} = \Phi \cdot \sin 2\pi \frac{t + \Delta}{T} \quad 2)$$

Somit ist:

$$\overline{MP'} = \overline{N'P'} - \overline{NP} = \Phi \cdot \left\{ \sin 2\pi \frac{t}{T} \cdot \cos 2\pi \frac{\Delta}{T} + \cos 2\pi \frac{t}{T} \cdot \sin 2\pi \frac{\Delta}{T} - \sin 2\pi \frac{t}{T} \right\}$$

Unseren Annahmen nach ist nun aber Δ eine sehr kleine Größe, demnach ist $2\pi \frac{\Delta}{T}$ ein sehr kleiner Winkel. Der Cosinus eines

sehr kleinen Winkels kann ohne merklichen Fehler gleich 1 gesetzt, der Sinus eines sehr kleinen Winkels mit dem Winkel selbst vertauscht werden.

Danach ist:

$$\begin{aligned} MP' &= \Phi \left\{ \sin 2\pi \frac{t}{T} + 2\pi \frac{\Delta}{T} \cdot \cos 2\pi \frac{t}{T} - \sin 2\pi \frac{t}{T} \right\} = \\ &= \Phi \cdot 2\pi \frac{\Delta}{T} \cdot \cos 2\pi \frac{t}{T} \quad 3) \end{aligned}$$

Hiernach ist:

$$\begin{aligned} \text{tg NTP} &= \frac{\overline{MP'}}{\overline{MP}} = \frac{\Phi \cdot 2\pi \frac{\Delta}{T} \cdot \cos 2\pi \frac{t}{T}}{\Delta} = \Phi \cdot \frac{2\pi}{T} \cdot \cos 2\pi \frac{t}{T} = \\ &= \Phi \cdot \frac{2\pi}{T} \cdot \sin \left(\frac{\pi}{2} - 2\pi \frac{t}{T} \right) = -\Phi \frac{2\pi}{T} \cdot \sin \left(2\pi \frac{t}{T} - \frac{\pi}{2} \right) \quad . . . 4) \end{aligned}$$

Da nun aber tg NTP die induzierte EMK mißt, so erkennt man, daß die durch die Induktion in den Windungen des Elektromagneten erzeugte EMK ebenfalls angenähert als eine Sinusfunktion angesehen werden kann, die zwar die gleiche Periode wie der Strom besitzt, aber um eine Viertelwellenlänge oder, was dasselbe ist, um

eine Viertelperiode $\left(\frac{2\pi}{4} = \frac{\pi}{2}\right)$ gegen die Stromkurve verzögert und entgegengesetzt gerichtet ist.

Soll in einem mit Selbstinduktion behafteten Stromkreise ein Wechselstrom von einer bestimmten Spannung, wie sie zum Betriebe von Glühlampen erforderlich ist, erzeugt werden, so muß die Elektrizitätsquelle eine höhere Spannung entwickeln, als zur Überwindung des Widerstandes nötig ist, weil auch die EMK der Selbstinduktion mit überwunden werden muß.

Wir haben bereits gelernt, die nach einem Sinusgesetz veränderlichen periodischen Größen durch Vektoren darzustellen. Dieses Verfahren wollen wir jetzt auf den vorliegenden Fall anwenden. (Vergl. Fig. 18.)

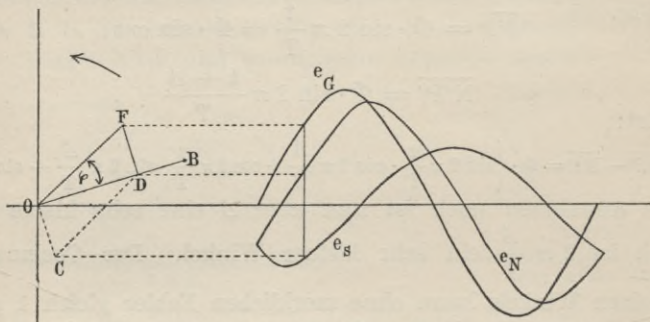


Fig. 18. Widerstand und Selbstinduktion in Hintereinanderschaltung.

$J = \overline{OB}$ sei der in einem bestimmten Maßstabe ausgedrückte Maximalwert des Stromes. Um in dem gesamten Widerstande w einen Strom J hervorzurufen, würde eine Spannung $e_N = J \cdot w$ nötig sein.

Diese Spannung e_N (die Nutzspannung), die mit dem Strome in gleicher Phase ist, tragen wir in einem anderen passenden Maßstabe in der Richtung von OB auf; es sei $e_N = J \cdot w = \overline{OD}$.

Um $90^\circ = \frac{\pi}{2}$ in der Bewegungsrichtung der Vektoren zurückbleibend, tragen wir von O aus die Größe $\overline{OC} = E_s$ den Maximalwert der EMK der Selbstinduktion auf. Die zur Überwindung dieser EMK erforderliche Komponente der Spannung oder der EMK der Elektrizitätsquelle muß diesem Vektor gleich, aber entgegengesetzt gerichtet sein; sie wird daher am Punkte D durch \overline{DF} dargestellt.

Bilden wir nunmehr die Resultante aus \overline{OD} und \overline{DF} , so erhalten wir die EMK der Elektrizitätsquelle $\overline{OF} = e_G$, die erforderlich ist, um trotz der im Stromkreise vorhandenen Selbstinduktion den Strom \overline{OB} zu erzeugen.

Wir erkennen sofort, daß diese Spannung der Elektrizitätsquelle E_g dem Strome um die Phasendifferenz $\text{DOF} = \varphi$ voreilt, oder daß der erzeugte Strom infolge der Selbstinduktion um den Winkel φ gegen die Spannung \overline{OF} der Elektrizitätsquelle zurückbleibt.

Die Größe der von der Selbstinduktion hervorgerufenen EMK hängt einmal ab von einem durch die Zahl der Windungen, durch die Abmessungen und durch die magnetischen Eigenschaften des Eisenkernes bedingten Koeffizienten, dem Selbstinduktionskoeffizienten L , ferner von der Stromstärke J , da ein m mal größerer Strom auch m mal soviel Kraftlinien erzeugt.¹⁾

Ist i die momentane Stromstärke eines Wechselstromes und Li die Zahl der Kraftlinien, die mit diesem Strome in diesem Augenblicke verkettet ist, so nennt man L den Selbstinduktionskoeffizienten.²⁾ $4 \sim Li$ ist die mittlere Zahl von Kraftlinien, die in einer Sekunde in dem vom Wechselstrome durchflossenen Leiter entstehen, verschwinden und in entgegengesetztem Sinne entstehen, wenn man mit \sim die Anzahl vollständiger Perioden des Wechselstromes in einer Sekunde bezeichnet. Da nun bei Änderungen nach einer Sinusfunktion der Höchstbetrag zum mittleren Betrage sich wie $\frac{\pi}{2} : 1$ verhält,³⁾ so

ist $2\pi \sim$ der Höchstbetrag der Anzahl der Schnitte von Kraftlinien, und der Maximalwert E_{\max} der induzierten EMK ist:

$$E_{\max} = 2\pi \sim LJ, \quad e_{\text{eff}} = 2\pi \sim Li_{\text{eff}}.$$

Die großen Buchstaben beziehen sich auf die Maximalwerte der Spannung und Stromstärke, e_{eff} und i_{eff} sind die effektiven Werte (Wurzel aus der Summe der Quadrate).

Außerdem aber ist die induzierte EMK auch proportional der Geschwindigkeit ω , mit der die Kraftlinienzahl in der Zeiteinheit geändert wird. In der Zeit T wird eine volle Umdrehung eines Vektors, also eine Drehung um 2π oder 360° stattfinden. Die Geschwindigkeit, mit der die Drehung erfolgt, d. h. die Winkeländerung in der Zeiteinheit ω ist somit:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi \cdot \sim \dots \dots \dots 5)$$

wenn man mit \sim die Frequenz, d. i. die Anzahl der ganzen Perioden des Wechselstromes innerhalb einer Sekunde, bezeichnet.

Die EMK der Selbstinduktion $\overline{OC} = e_s$ ist hiernach:

$$e_s = L \cdot J \cdot \omega \dots \dots \dots 6)$$

¹⁾ Insoweit als es statthaft ist, die Permeabilität des Eisens, aus dem der Kern besteht, als konstant anzusehen.

²⁾ Vergl. Gleichstromtechnik, Kap. IX, 6., S. 187.

³⁾ Vergl. Kap. 1, 7., S. 11.

Aus Figur 18 erkennt man sofort, daß:

$$\overline{OF}^2 = \overline{OD}^2 + \overline{DF}^2$$

oder $e_G = \sqrt{w^2 J^2 + L^2 J^2 \omega^2} = J \cdot \sqrt{w^2 + L^2 \omega^2} \dots 7)$
ist.

Man erkennt, daß

$$e_G^2 = e_N^2 + e_s^2$$

ist; e_G , die Spannung der Elektrizitätsquelle, kann somit als die Hypotenuse eines rechtwinkligen Dreiecks angesehen werden, dessen eine Kathete die zur Wirkung kommende Nutzspannung e_N , dessen andere Kathete die EMK der Selbstinduktion e_s ist.

Aus Gl. 7) folgt:

$$J = \frac{e_G}{\sqrt{w^2 + L^2 \omega^2}} \dots \dots \dots 8)$$

Für Wechselstromkreise mit Selbstinduktion gilt daher ebenfalls das Ohmsche Gesetz, an Stelle des Widerstandes tritt jedoch der Ausdruck $\sqrt{w^2 + \omega^2 L^2}$. Bei Wechselstrom gilt das Ohmsche Gesetz in seiner alten Form nur, wenn $L = 0$ ist, d. h. wenn keine Selbstinduktion im Stromkreise vorhanden ist. Wenn aber Selbstinduktion vorhanden ist, so wird die Stromstärke um so mehr kleiner, als sie nach dem Ohmschen Gesetze sein würde, je größer L und je höher die Frequenz des Stromes, je größer \sim und damit ω ist.

Die Selbstinduktion aber veranlaßt nicht nur eine Verringerung der Stromstärke, sie wirkt nicht bloß wie eine Vergrößerung des Widerstandes, sondern gleichzeitig wird das Auftreten des Stromes zeitlich verzögert.

Man nennt daher die Größe $\sqrt{w^2 + L^2 \omega^2}$ den verzögernden Widerstand, scheinbaren Widerstand, oder die Impedanz des Wechselstromes.¹⁾

Die Größe $L \omega$, das Produkt aus dem Koeffizienten der Selbstinduktion L und der Winkelgeschwindigkeit ω , mit der sich die den Wechselstrom darstellenden Vektoren drehen, führt den Namen induktiver Widerstand, Induktanz oder Reaktanz.

Man erkennt sofort aus der Form des Ausdruckes für die Impedanz, daß sie sich als Hypotenuse eines rechtwinkligen Dreiecks darstellen läßt, dessen eine Kathete der Ohmsche Widerstand, dessen andere Kathete die Induktanz ist. (Vergl. Fig. 19.)

¹⁾ Der Ausdruck Impedanz ist von O. Heaviside eingeführt worden.

Wir wollen übrigens nicht unterlassen, schon an dieser Stelle zu bemerken, daß der scheinbare Widerstand wegen des Faktors ω in der Selbstinduktion auch von der Kurvenform des Wechselstromes abhängig ist und mit dieser sich ändert. Eine Spule bietet somit einem Wechselstrom verschiedene scheinbare Widerstände dar, sowohl je nach der Periodenzahl \sim , als auch je nach der Kurve, die den Verlauf des Wechselstromes darstellt.

Über die Größe der Phasendifferenz, die Größe des Winkels φ , um den der Strom gegen die ihn veranlassende EMK infolge der Selbstinduktion zurückbleibt, gibt die ebenfalls aus der Fig. 18 folgende Gleichung Auskunft:

$$\tan \varphi = \tan \text{FOD} = \frac{\overline{\text{FD}}}{\text{OD}} = \frac{L \omega J}{w J} = \frac{L \omega}{w} \quad \dots \quad 9)$$

Man ersieht, daß die Phasenverschiebung des Stromes gegen die EMK um so größer ausfällt, je größer die Selbstinduktion im Vergleich zum Widerstande ausfällt; daß sie aber nur dann 90° werden könnte, wenn der Ohmsche Widerstand w verschwindend im Vergleich zum Betrage Selbstinduktion L wird.

Auch in dem soeben gezeichneten rechtwinkligen Dreieck (Fig. 19) tritt der Winkel φ , die Phasenverschiebung, auf.

Die Selbstinduktion stellt eine der gegebenen EMK (Spannung) entgegengerichtete EMK dar und bewirkt, daß in einem Wechselstromkreise die Stromstärke einen kleineren Wert annimmt als in einem Gleichstromkreise von gleicher EMK und Widerstand. Eine weitere Folge hiervon ist, daß die Stromstärke ihre Null- und Maximalwerte später erreicht wie die sie erzeugende EMK, sie ist also in ihrem Bewegungszustande, d. i. in ihrer Phase, gegen die der Spannung zurück, zwischen beiden besteht eine Phasenverschiebung. Diesen doppelten Einfluß der Selbstinduktion, einer Verkleinerung und Verzögerung der Stromstärke, kann man sich in der Wirkung auch dadurch ersetzt denken, daß der Stromkreis bei Wechselstrombetrieb einen anderen, scheinbaren Widerstand annimmt, welcher einmal größer ist als der reine Ohmsche Widerstand, der von dem Durchströmen des Drahtes herrührt (bei Gleichstrom), sodann auf den Strom verzögernd einwirkt. Dieser scheinbar größere und verzögernde, hemmende Widerstand, die Impedanz, hängt außer von dem Ohmschen Widerstande noch von dem magnetischen Zustande des den Leiter umgebenden Mediums sowie von der Wechselzahl des Stromes ab. Die Impedanz hat somit keine reale Existenz, sondern bildet nur eine andere Darstellung der Wirkungen der Selbstinduktion.

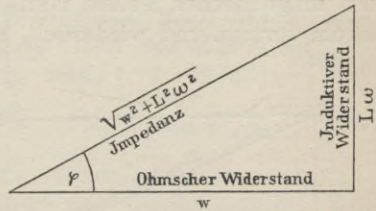


Fig. 19. Zusammensetzung des Ohmschen Widerstandes und der Induktanz zur Impedanz.

Die Wirkungen der letzteren kann man sich aber auch noch in der Weise erklären, daß man sich den wirklich vorhandenen Strom aus zwei Teilströmen oder Komponenten zusammengesetzt denkt. Ein magnetisches Feld, gleichgiltig welchen Ursprunges, stellt eine gewisse Energiemenge dar. Es muß daher eine entsprechende

Die Wirkungen der letzteren kann man sich aber auch noch in der Weise erklären, daß man sich den wirklich vorhandenen Strom aus zwei Teilströmen oder Komponenten zusammengesetzt denkt.

Ein magnetisches Feld, gleichgiltig welchen Ursprunges, stellt eine gewisse Energiemenge dar. Es muß daher eine entsprechende

Energiemenge aufgewendet werden, um ein solches Feld zu schaffen. Schließt man daher einen mit Selbstinduktion behafteten Stromkreis, d. h. einen Stromkreis, welcher ein magnetisches Feld ausbildet, so steigt der Strom nicht momentan auf seinen Endwert an, sondern die Selbstinduktion, welche sich dem Ansteigen der Stromstärke widersetzt, bewirkt ein allmähliches Anwachsen, oder auch, was dasselbe bedeutet, ein Teil des Stromes wird im Anfang dazu verbraucht, das magnetische Feld zu bilden. Die in diesem Felde angehäuften Energie ist aber nicht verloren, sondern wird wieder frei und nutzbar, sobald man den Stromkreis öffnet oder die Stromrichtung umkehrt. Das magnetische Feld des Stromkreises läßt den Strom langsamer abfallen und später auf Null sinken als die Öffnung geschieht. Es findet also eine Aufspeicherung und Rückgabe von Energie mittels des magnetischen Feldes statt. Da dieser Vorgang sich bei Wechselstrom fortdauernd wiederholt, so wird auch hier ständig ein Teil des

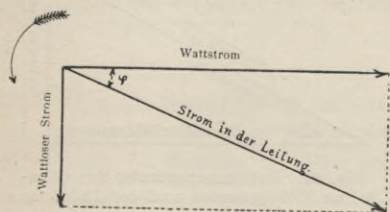


Fig. 20. Zerlegung des Stromes in zwei Komponenten.

Stromes zur Bildung des magnetischen Feldes verbraucht, um im nächsten Augenblick beim Sinken des Gesamtstromes wieder frei zu werden. Diesen Teilstrom nennt man den wattlosen Strom. Den anderen Strom, welcher die wirkliche elektrische Leistung des Stromkreises repräsentiert, nennt

man dagegen den Arbeits- oder Wattstrom. Wattloser und Wattstrom sind in ihrer Phase um 90° oder eine Viertelwelle auseinander. Den resultierenden, d. h. den wirklich in dem Kreise fließenden Strom erhält man in graphischer Darstellung (siehe Fig. 20) aus dem wattlosen und Wattstrom als Resultierende nach dem Parallelogramm der Kräfte. Die dem Kreise zugeführte EMK würde hierbei in die Richtung des Arbeits- oder Wattstromes fallen. Die wirklich verbrauchte Arbeit in Watt ergibt sich daher durch das Produkt der Gesamtspannung mit dem Wattstrom.

2. Magnetisches Feld und Selbstinduktion.

Erzeugt ein Wechselstrom in einer Spule von n Windungen ein magnetisches Wechselfeld, so ist die hierzu erforderliche EMK (Gl. 7):

$$E_{\max} = 2 \pi \sim L \cdot n \cdot J_{\max}.$$

Die durch den Strom J_{\max} maximal erzeugte Kraftlinienzahl ist:

$$\Phi_{\max} = \frac{4 \pi J_{\max} n}{w},$$

wenn w den magnetischen Widerstand des Kraftlinienweges bedeutet.

Nun ist aber auch:

$$E_{\max} = 2 \pi \sim n \Phi_{\max} \dots \dots \dots 10)$$

somit $L J_{\max} = \Phi_{\max} \dots \dots \dots 11)$

oder $L J_{\max} = \frac{4 \pi J_{\max} \cdot n^2}{w}$

Daraus ergibt sich die Definition des Selbstinduktionskoeffizienten L

$$L = \frac{4 \pi n^2}{w} \dots \dots \dots 12)$$

Für manche Zwecke ist es bequemer, die EMK durch Selbstinduktionskoeffizienten auszudrücken, für andere Fälle bedient man sich mit Vorteil des Ausdruckes, in dem die Kraftlinienzahl vorkommt.

Da die später zu besprechenden Eigenschaften der Hysteresis wesentlich von der maximalen Kraftlinienzahl abhängen, beläßt man Φ_{\max} meist in den Formeln. Die EMK wird aber meist durch ihren quadratischen Mittelwert ausgedrückt, da dieser von den Meßinstrumenten angegeben wird. Es ist (vergl. Kap. 1, 7., S. 13):

$$E_{\text{eff}} = \frac{E_{\max}}{\sqrt{2}} = \frac{2 \pi \sim n \Phi_{\max}}{\sqrt{2}} = 4,44 \sim n \Phi_{\max}.$$

Geht man aber von den bis jetzt verwendeten absoluten Einheiten zu praktischen Einheiten über und berücksichtigt, daß 1 Volt = 10^8 absolute Einheiten ist, so erhalten wir:

$$E_{\text{eff}} = 4,44 \sim n \Phi_{\max} \cdot 10^{-8} \text{ Volt} \dots \dots \dots 13)$$

Führt man den in Gl. 12) gewonnenen Ausdruck in 11) ein, so ergibt sich:

$$\Phi_{\max} = \frac{L}{n} \cdot J_{\max} = \sqrt{2} \cdot \frac{L}{n} \cdot J_{\text{eff}}.$$

In praktischen Einheiten ist:

$$\Phi_{\max} = \frac{4 \pi J_{\max} n}{w} \cdot 10^{-1} = 1,257 \frac{J_{\max} \cdot n}{w} \dots \dots \dots 14)$$

Nun ist $w = \frac{\lambda}{\mu \cdot Q}$, wo λ die Länge des Kraftlinienweges, μ die Permeabilität des von den n Windungen umfaßten Materiales, Q der Querschnitt ist. Somit ist

$$\Phi_{\max} = 1,257 \cdot \frac{J_{\max} \cdot n \cdot Q \cdot \mu}{\lambda}.$$

Verwendet man statt J_{\max} den effektiven Wert $J_{\text{eff}} = \frac{J_{\max}}{\sqrt{2}}$, so ergibt sich

$$\Phi_{\max} = \frac{1,257 \cdot \sqrt{2} \cdot J_{\text{eff}} \cdot n \cdot Q \cdot \mu}{\lambda} = 1,77 \cdot \frac{\mu \cdot Q \cdot J_{\text{eff}} \cdot n}{\lambda} \dots \dots \dots 15)$$

Beachtet man ferner, daß $\frac{\Phi_{\max}}{Q} = \mathfrak{B}_{\max}$, gleich der maximalen

magnetischen Induktion ist, so erhält man:¹⁾

$$\mathfrak{B}_{\max} = 1,77 \cdot \frac{\mu \cdot J_{\text{eff}} \cdot n}{\lambda} = 1,257 \frac{\mu \cdot J_{\max} \cdot n}{\lambda} \dots 16)$$

3. Der Selbstinduktionskoeffizient.

Aus den vorhergehenden Betrachtungen ergibt sich, daß wir unter dem Selbstinduktionskoeffizienten eines Apparates die Anzahl von Kraftlinien verstehen, die ein Strom von der Stärke 1 hervorruft. Dabei müssen wir uns erinnern, daß die Einheit der Stromstärke im absoluten Maßsystem 10mal größer ist als das Ampère.

Man erhält also, wie dies auch schon früher (Gleichstromtechnik VIII, 6., S. 132) geschehen ist, die Dimension des Selbstinduktionskoeffizienten, wenn man die Dimension des magnetischen Gesamtfeldes durch die Dimension der Stromstärke²⁾ dividiert:

$$\text{Dim L} = \frac{[\text{cm}^2] \cdot [\text{cm}^{-\frac{1}{2}} \text{g}^{\frac{1}{2}} \text{sek}^{-1}]}{[\text{cm}^{\frac{1}{2}} \text{g}^{\frac{1}{2}} \text{sek}^{-1}]} = \frac{[\text{cm}^{\frac{3}{2}} \text{g}^{\frac{1}{2}} \text{sek}^{-1}]}{[\text{cm}^{\frac{1}{2}} \text{g}^{\frac{1}{2}} \text{sek}^{-1}]} = [\text{cm}^1] \quad 17)$$

Die Dimension des Selbstinduktionskoeffizienten ist hiernach eine Länge; die absolute Einheit derselben ist das Zentimeter.

Da die Einheit des Gesamtfeldes oder die der Spannung (des Volts) gleich 10^8 absolute Einheiten und das Ampere 10^{-1} der absoluten Stromeinheit ist, so ist die praktische Einheit der Selbstinduktion $\frac{10^8}{10^{-1}} = 10^9 \text{ cm}$. Diese Größe: 10^9 cm ist angenähert die

Länge des Erdquadranten und führt nach den Beschlüssen des Elektriker-Kongresses in Chicago den Namen Henry.

Bei den meisten theoretischen Betrachtungen wird der Selbstinduktionskoeffizient als eine Konstante des betreffenden Apparates angesehen. Das ist aber nur in sehr roher Annäherung richtig. Dieser Koeffizient hängt außer von der Anzahl der Windungen von den Abmessungen des Kernes und von der magnetischen Permeabilität des Materials ab, aus dem der Kern hergestellt ist. Da nun aber für größere Kraftliniendichte die Permeabilität abnimmt, so ist auch der Koeffizient der Selbstinduktion von der Beanspruchung des Materials, besonders auch von der Stromstärke abhängig. Auch außerhalb der Leiter findet, abgesehen von der Stromwärme nach dem Jouleschen Gesetze bei Wechselströmen, eine Umsetzung von elektrischer Energie in Wärme statt. Dieselbe rührt her von molekularen Vorgängen, z. B. magnetischer und dielektrischer Hysteresis,

¹⁾ Anwendungen dieser Formeln in Form von Beispielen findet man Kap. VIII, Abschn. 3.

²⁾ Vergl. Gleichstromtechnik, Kap. IX, 6., S. 187.

von den Foucaultströmen und von sonstigen Induktionerscheinungen in benachbarten Leitern.

Man erkennt daraus aufs neue, daß alle Rechnungen, bei denen die oben erwähnte Annahme gemacht wird, nur als ziemlich rohe Annäherung an die Wahrheit betrachtet werden können.

In einem gegebenen Falle kann jedoch die Formel 7)

$$E = J \cdot \sqrt{w^2 + L^2 \cdot \omega^2}$$

als gültig betrachtet werden, wenn man unter w nicht mehr den wahren mit Gleichstrom gemessenen Widerstand, sondern die Größe versteht, welche man erhält, wenn man die gesamte in Wärme umgesetzte Energie Q durch das Quadrat der effektiven Stromstärke dividiert und die Reaktanz $L \cdot \omega$ als durch die Formel 7) selbst definiert betrachtet. Alsdann sind aber, wie bereits erwähnt, weder w noch L Konstanten des Stromkreises.

Ein geradliniger Draht aus unmagnetischem Material von der Länge l und dem Durchmesser d besitzt einen Selbstinduktionskoeffizienten L

$$L = 2 l \cdot \left(\log_{\text{nat}} \frac{4l}{d} - \frac{3}{4} \right) \cdot 10^{-9} \text{ Henry} \quad 18)$$

Bei magnetischem Material tritt an die Stelle von $\frac{3}{4}$ die Größe $\frac{\mu}{4} - 1$, wenn man mit μ die magnetische Permeabilität des Materiales versteht.

Denken wir uns um einen Eisenkern eine Spule von n Windungen gelegt, und ist der magnetische Widerstand, den die Kraftlinien zu überwinden haben w , so ist der Selbstinduktionskoeffizient L dieser Spule (Gl. 12):

$$L = \frac{4 \pi n^2}{w} \cdot 10^{-9} \text{ Henry}.$$

Wäre der Eisenkern ein Ring vom Querschnitt Q , besäße die Permeabilität den Wert μ , hätte endlich der mittlere Weg der Kraftlinien die Länge λ , so wird in diesem besonderen Falle

$$L = \frac{4 \pi \cdot n^2 \cdot Q \cdot \mu}{\lambda} 10^{-9} \text{ Henry} \quad 19)$$

Wäre um denselben Kraftlinienweg vom magnetischen Widerstand w noch eine zweite Spule von n_1 Windungen gelegt, so wäre deren Selbstinduktionskoeffizient:

$$L_1 = \frac{4 \pi n_1^2}{w}.$$

Der Koeffizient der gegenseitigen Induktion M wäre:

$$M = \sqrt{L \cdot L_1} \quad 20)$$

Diese Formel gilt allerdings nur unter der Voraussetzung, daß keine magnetische Streuung stattfindet, d. h. daß sämtliche Kraft-

linien, die durch die eine Spule hindurchgehen, auch von der anderen Spule mit umfaßt werden.

Bei Wechselstromapparaten ist diese Voraussetzung stets nur annähernd erfüllt, da ein gewisses Maß magnetischer Streuung niemals gänzlich vermieden werden kann.

4. Widerstände mit Selbstinduktion in Hintereinanderschaltung.

Es ist eine für die Praxis wichtige Frage zu entscheiden, welche Impedanz mehrere mit Selbstinduktion behaftete Widerstände ausüben, wenn sie hintereinander von demselben Wechselstrom durchflossen werden (Fig. 21). Die schon vorher angewendete Konstruktion mit Hilfe der Vektoren bietet auch hier den Weg zur Lösung.

Man zeichnet ein rechtwinkliges Dreieck ABC (vergl. Fig. 22), in dem die Kathete AB der Ohmsche Widerstand w_1 des ersten mit Selbstinduktion behafteten Apparates ist,

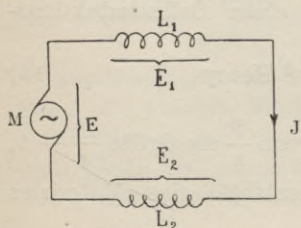


Fig. 21. Widerstände mit Selbstinduktion in Hintereinanderschaltung.

und trägt an A die Kathete $\overline{AC} = \omega L_1$ auf, wobei ω die Winkelgeschwindigkeit des den Strom darstellenden Vektors und L_1 der Selbstinduktionskoeffizient des ersten Apparates ist. Dann ist \overline{BC} die Impedanz des ersten Apparates. An C trägt man dann parallel zu AB den Ohmschen Widerstand des zweiten Apparates gleich \overline{CD} auf und errichtet in D dazu

die Senkrechte \overline{DE} , die man gleich ωL_2 macht. Dann ist \overline{CE} die Impedanz des zweiten Apparates und \overline{BE} die Impedanz beider hintereinander geschalteter Apparate zusammen.

Es bedarf kaum der Erwähnung, daß man dieses Verfahren, in gleicher Weise fortfahrend, auf beliebig viele hintereinander geschaltete Apparate mit Selbstinduktion anwenden und die Impedanz eines ganzen, ungeteilten Stromkreises bestimmen kann.

Der Winkel \overline{EBA} gibt gleichzeitig die Phasenverschiebung, die der Strom gegen die EMK erfährt.

Ebenso wenig bedarf es eines Beweises, daß man zu demselben Wert von \overline{BE} nach Größe und Richtung gelangt, wenn man erst den Ohmschen Widerstand \overline{BA} , dann in derselben Richtung fortgehend, den Ohmschen Widerstand \overline{CD} anträgt und am Ende F dieser Strecke eine Senkrechte errichtet, die man gleich der Summe der induktiven Widerstände $\omega L_1 + \omega L_2 = \overline{AC} + \overline{DE}$ macht. (Vergl. Fig. 23.)

Auch dieses Verfahren läßt sich mehr als zweimal anwenden.

Die Impedanz eines unverzweigten, aus mehreren hintereinander geschalteten Widerständen und Vorrichtungen mit Selbstinduktion zusammengesetzten Stromkreises ist daher:

$$x = \sqrt{(w_1 + w_2 + w_3 + \dots)^2 + \omega^2 (L_1 + L_2 + L_3 + \dots)^2} \quad . \quad 14)$$

Kommen im Stromkreise Widerstände vor, die keine Selbstinduktion enthalten, hat z. B. w_2 keine Selbstinduktion, so setzt man einfach den Selbstinduktionskoeffizienten L_2 dieses Teiles gleich Null. An der Konstruktion ändert das im Prinzipie nichts.

Auch für die EMKräfte gelten ähnliche Betrachtungen. Nennen wir die Momentanwerte der EMKräfte, die in den einzelnen hintereinander geschalteten induktiven Widerständen auftreten, e_1, e_2, e_3, \dots und e den Momentanwert der EMK in der Zuführungsleitung, so ist

$$e = e_1 + e_2 + e_3 + \dots$$

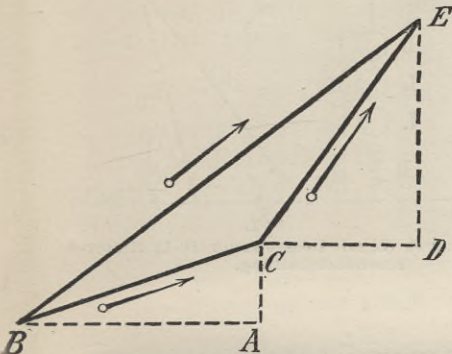


Fig. 22.

Widerstände mit Selbstinduktion in Hintereinanderschaltung.

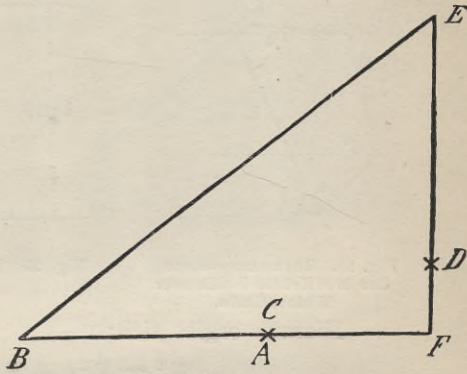


Fig. 23.

Bezeichnen wir mit i den gleichzeitigen Momentanwert der Stromstärke, so ist $e \cdot i = e_1 \cdot i + e_2 i + e_3 i + \dots$

Es ist also auch der Momentanwert der Gesamtarbeit a gleich der Summe der momentanen Einzelarbeiten a_1, a_2, a_3 oder:

$$a = a_1 + a_2 + a_3 + \dots$$

Außerdem muß aber auch selbstverständlich der Mittelwert der Gesamtarbeit A gleich der Summe der Mittelwerte der Einzelarbeiten $A_1 + A_2 + A_3 + \dots$ sein, es ist somit:

$$A = A_1 + A_2 + A_3 + \dots$$

folglich

$$E \cdot J \cdot F = E_1 \cdot J \cdot F_1 + E_2 \cdot J \cdot F_2 + E_3 \cdot J \cdot F_3 + \dots$$

wenn man mit F die Leistungsfaktoren bezeichnet.

Hebt man den Mittelwert der Stromstärke auf beiden Seiten, so wird:

$$E \cos \varphi = E_1 \cdot \cos \varphi_1 + E_2 \cos \varphi_2 + E_3 \cdot \cos \varphi_3 + \dots \quad . \quad 21)$$

Dies läßt sich wiederum graphisch darstellen durch Addition der Vektoren, wie dies in nebenstehendem Diagramm (Fig. 24) geschehen ist. Bei Hintereinanderschaltung werden somit die Einzelspannungen als Vektoren addiert.

Ist einem nichtinduktiven Widerstand, z. B. Lampen, ein induktiver Widerstand (eine Drosselspule) vorgeschaltet, so ist in den Lampen die Spannung mit der Stromstärke in gleicher Phase.

Das nebenstehende Diagramm (Fig. 25) stellt dann die Verhältnisse dar. Dann ist:

$$E^2 = E^2_L + E^2_D + 2 E_L \cdot E_D \cdot \cos \varphi_D.$$

Setzt man für $E_L \cdot E_D \cdot \cos \varphi_D = \frac{E_L}{J} \cdot E_D \cdot J \cdot \cos \varphi_D = \frac{E_L}{J} \cdot A_D$,

so ist A_D die Effektaufnahme der Drosselspule.

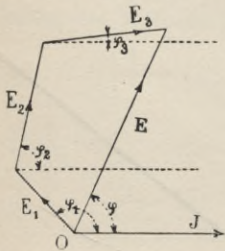


Fig. 24. Zusammensetzung der EM Kräfte induktiver Widerstände.

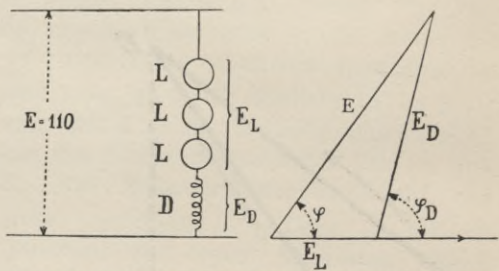


Fig. 25. Lampen (L) mit Drosselspule (D) in Hintereinanderschaltung.

Hieraus ergibt sich:

$$E^2 = E^2_L + E^2_D + \frac{2 E_L}{J} \cdot A_D.$$

Aus dieser Gleichung kann der Spannungsverlust in der Drosselspule berechnet werden.

Nennt man w_L den Widerstand der induktionsfreien Lampen, so ist $E_L = J w_L$. Man erhält daher:

$$A_D = \frac{E^2 - E^2_L - E^2_D}{2 w_L} = \frac{E^2 - E^2_L - E^2_D}{2 E_L} \cdot J \quad \dots \quad 22)$$

Hiernach kann die Effektaufnahme der Drosselspule bestimmt werden.

Da nun $E_D = J \cdot \cos \varphi_D = A_D$

ist, findet man:

$$\cos \varphi_D = \frac{E^2 - E^2_L - E^2_D}{2 E_L \cdot E_D} \quad \dots \quad 23)$$

Man nennt die auf diesen Gleichungen beruhende Messung der Effektaufnahme A_D eines induktiven Widerstandes oder die Bestimmung des Leistungsfaktors $\cos \varphi_D$ die Methode der drei Voltmeter.

5. Kurzschluß einer Wechselstrommaschine.

Wenn wir einen mit Wechselstrom gespeisten Leiterkreis betrachten, in dem Widerstand w und Selbstinduktion vorkommt, z. B. eine Wechselstrommaschine, die durch einen induktionsfreien Widerstand geschlossen ist, so können wir den induktionsfreien Widerstand mehr und mehr verkleinern und schließlich fast null werden lassen. Es tritt dies ein, wenn wir die Klemmen der Wechselstrommaschine durch einen kurzen, dicken Kupferdraht verbinden, einen Kurzschluß herstellen.

Zeichnen wir das Vektorendreieck der EM Kräfte, wie in Fig. 18, S. 24, so bleibt die Hypotenuse OF konstant. Der Winkel φ , dessen Tangente:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{FD}{OD} = \frac{\omega L}{w}$$

ist, wächst je mehr w abnimmt, und φ nähert sich immer mehr

$$90^\circ = \frac{\pi}{2}.$$

In der Fig. 26 ist

$$FD = OF \cdot \sin \varphi$$

somit: $\omega \cdot L \cdot J = E \cdot \sin \varphi$
und

$$J = \frac{E}{\omega \cdot L} \cdot \sin \varphi.$$

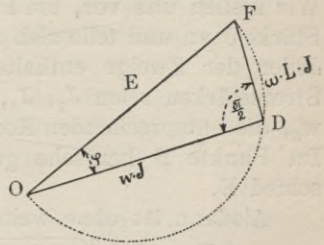


Fig. 26. Kurzschluß einer Wechselstrommaschine.

Der Strom wächst somit, wenn w abnimmt, aber nicht ins Unbestimmte, sondern er nähert sich, je mehr φ dem Betrage $\frac{\pi}{2}$ nahe-

kommt, dem Grenzwerte $\frac{E}{\omega \cdot L}$. Der Punkt D in Fig. 26 bewegt sich auf dem Halbkreise, den man über OF schlagen kann, mehr und mehr nach O hin.

Der Mittelwert der geleisteten Arbeit (vergl. Kap. I, 9, S. 17, Gl. 14)

$$\text{ist } a_{\text{eff}} = i_{\text{eff}} \cdot e_{\text{eff}} \cdot \cos \varphi \text{ und } i_{\text{eff}} = \frac{J}{\sqrt{2}} \quad e_{\text{eff}} = \frac{E}{\sqrt{2}}.$$

Wir erhalten somit, wenn wir für J seinen Wert einsetzen,

$$a_{\text{eff}} = \frac{1}{2} \frac{E^2}{\omega L} \cdot \sin \varphi \cdot \cos \varphi$$

oder, da $\sin 2 \varphi = 2 \cdot \sin \varphi \cdot \cos \varphi$ ist:

$$a_{\text{eff}} = \frac{1}{4} \frac{E^2}{\omega \cdot L} \sin 2 \varphi 24)$$

Die Arbeit wächst somit anfänglich, solange 2φ kleiner als $\frac{\pi}{2}$

oder $\varphi < \frac{\pi}{4}$ ist, dann aber nimmt die Arbeit wieder ab und strebt mit abnehmendem w dem Werte Null zu.

Da bei Wechselstrommaschinen w meist gering und die Selbstinduktion L erheblich ist, kann man somit eine solche Maschine unbedenklich kurz schließen, ohne eine gefährliche Erhitzung der Ankerdrähte befürchten zu müssen.

6. Impedanz parallel geschalteter Widerstände mit Selbstinduktion.

Wir behandeln in diesem Abschnitte den Fall, der bei Gleichstrom den Betrachtungen über die Kirchhoffschen Gesetze entspricht. Wir stellen uns vor, am Punkte A komme ein Wechselstrom von der Stärke J an und teile sich dort in mehrere parallel geschaltete Zweige. Jeder der Zweige enthalte Widerstände mit Selbstinduktion. Die Stromstärken seien J_1, J_2, J_3 , die Widerstände der Zweige w_1, w_2, w_3 , die entsprechenden Koeffizienten der Selbstinduktion L_1, L_2, L_3 . Im Punkte B herrsche gegen den Punkt A ein Spannungsunterschied E .

Alsdann ist ohne weiteres klar, daß

$$E = J_1 \cdot \sqrt{w_1^2 + \omega^2 L_1^2} = J_2 \cdot \sqrt{w_2^2 + \omega^2 L_2^2}$$

sein muß, d. h. daß die Proportion gilt:

$$J_1 : J_2 = \sqrt{w_2^2 + \omega^2 L_2^2} : \sqrt{w_1^2 + \omega^2 L_1^2} \dots 25)$$

Man erkennt, daß die Stromstärke in jedem Zweige der Impedanz des Zweiges umgekehrt proportional ist.

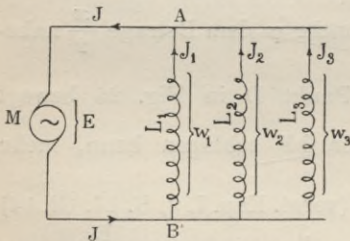


Fig. 27. Induktive Widerstände in Parallelschaltung.

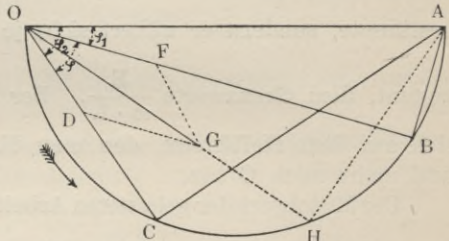


Fig. 28. Widerstände mit Selbstinduktion in Parallelschaltung.

Die Phasenverschiebungen in den beiden Zweigen sind bestimmt durch:

$$\text{tang } \varphi_1 = \frac{L_1 \omega}{w_1} \quad \text{und} \quad \text{tang } \varphi_2 = \frac{L_2 \omega}{w_2}.$$

Außerdem muß aber auch:

$$E = J \sqrt{w^2 + \omega^2 L^2}$$

sein, wenn wir mit $\sqrt{w^2 + \omega^2 L^2}$ die gesamte Impedanz der zwischen A und B liegenden, aus zwei parallel geschalteten Apparaten mit Widerstand und Selbstinduktion bestehenden Verzweigung bezeichnen.

Die Phasenverschiebung des resultierenden Stromes würde gleich

$$\text{tang } \varphi = \frac{L \omega}{w}$$

sein.

Die Aufgabe, den Strom J zu bestimmen, läßt sich zunächst einfacher auf graphischem Wege durch ein Vektorendiagramm erledigen. Den Maximalwert des Spannungsunterschiedes zwischen den Punkten A und B tragen wir in einem passenden Maßstabe von einem Punkte O aus auf eine Gerade ab (vergl. Fig. 28), machen also $OA = E$ und schlagen über OA einen Halbkreis.

Dann tragen wir entgegen der durch den Pfeil angedeuteten Drehrichtung dieses Vektors die Verzögerungswinkel der in beiden Zweigen fließenden Teilströme ab, wir machen also $AOB = \varphi_1$ und $AOC = \varphi_2$.

Dann sind die Sehnen OB und OC die in den Widerständen w_1 und w_2 verbrauchten Spannungen, es sind also die Größen $\overline{OB} = w_1 \cdot J_1$ und $\overline{OC} = w_2 \cdot J_2$. Dividieren wir also diese Längen durch die Widerstände w_1 und w_2 , so erhalten wir die Stromstärken J_1 und J_2 selbst. Diese Größen $J_1 = \frac{\overline{OB}}{w_1} = OD$ und $J_2 = \frac{\overline{OC}}{w_2} = OF$ trägt man in dem für die Stromstärke gewählten Maßstabe auf der Linie \overline{OB} beziehentlich \overline{OC} ab. Aus diesen beiden Strecken bildet man die Resultante nach dem Parallelogramm der Ströme und erhält den gesuchten resultierenden Strom $\overline{OG} = J$.

Der Winkel AOG ist der Winkel, um den der Gesamtstrom J gegen die Gesamtspannung verzögert ist, und man erkennt sofort, daß er zwischen φ_1 und φ_2 , den Phasenverzögerungen der Teilströme, gelegen ist.

Auch bedarf es kaum des besonderen Hinweises, daß die Größe i, d. i. die Vertikalprojektion der Maximalstromstärke in den verschiedenen Zeitpunkten, bald größer, bald kleiner als jeder der beiden Teilströme oder deren Summe sein kann.

In dem Diagramme ist, ganz in der Weise wie wir dies in Abschnitt 1, S. 24, Fig. 18, bereits gezeigt haben, \overline{OH} das Produkt wJ und \overline{AH} die Größe $J \omega L$. Wenn man diese Größen aus den erhaltenen Dreiecken auf dem Wege der Rechnung ermittelt, so findet man:

$$\text{man: } w = \frac{Q}{Q^2 + P^2 \cdot \omega^2} \quad L \omega = \frac{P \omega}{Q^2 + P^2 \cdot \omega^2} \quad \dots \quad 26)$$

worin:

$$\left. \begin{aligned} Q &= \frac{w_1}{w_1^2 + L_1^2 \omega^2} + \frac{w_2}{w_2^2 + L_2^2 \omega^2} + \dots \\ P &= \frac{L_1 \omega}{w_1^2 + L_1^2 \omega^2} + \frac{L_2 \omega}{w_2^2 + L_2^2 \omega^2} + \dots \end{aligned} \right\} 27)$$

ist.

Sind mehr als zwei Widerstände mit Selbstinduktion parallel geschaltet, so bestehen die Größen Q und P aus mehr als zwei ähnlich gebildeten Gliedern.

Auch an diesen Fall lassen sich noch einige Betrachtungen von Wichtigkeit anknüpfen.

Nennen wir die in den einzelnen parallel geschalteten, induktiven Widerständen herrschenden Momentanwerte der Stromstärke $i_1, i_2, i_3 \dots$ und den Momentanwert der Stromstärke im ungeteilten Stromkreis (vergl. Fig. 27, S. 36) i , so ist selbstverständlich nach dem 1. Kirchhoffschen Gesetze (Grundzüge der Gleichstromtechnik Kap. I, 19, S. 18)

$$i = i_1 + i_2 + i_3 + \dots$$

Multiplizieren wir mit dem allen Teilen des Stromkreises gemeinsamen Momentanwerte der EMKe, so erhalten wir:

$$ei = ei_1 + ei_2 + ei_3 + \dots$$

folglich ergibt sich:

$$a = a_1 + a_2 + a_3 + \dots \quad . \quad . \quad . \quad 28)$$

Die Summe der Momentanwerte der Einzelarbeiten ist gleich dem Momentanwert der Gesamtarbeit.

Nun ist:

$$e = E_{\max} \cdot \sin \omega t \quad i = J_{\max} \cdot \sin (\omega t - \varphi),$$

wenn φ die Verzögerung des Stromes hinter der EMK bedeutet, folglich:

$$a = E_{\max} \cdot J_{\max} \cdot \sin \omega t \cdot \sin (\omega t - \varphi) \quad . \quad . \quad . \quad 29)$$

Gehen wir nun zu den Mittelwerten für die Dauer einer Periode über, so ist:

$$M(a) = A = E_{\max} \cdot J_{\max} M [\sin \omega t \cdot \sin (\omega t - \varphi)]$$

oder:

$$A = E_{\max} \cdot J_{\max} \cdot \frac{1}{2} \cdot \cos \varphi \quad . \quad . \quad . \quad 30)$$

oder wenn wir die effektiven Werte, Mittelwerte E_{eff} und J_{eff} der Einfachheit wegen ohne Index als E und J schreiben:

$$A = E \cdot J \cdot \cos \varphi = E \cdot J \cdot F \quad . \quad . \quad . \quad 31)$$

wobei $F = \cos \varphi$ der Leistungsfaktor ist.

Dann ist, da auch der Mittelwert der Gesamtarbeit gleich der Summe der Mittelwerte der Einzelarbeiten sein muß:

$$A = A_1 + A_2 + A_3 + \dots$$

oder

$$E \cdot J \cdot \cos \varphi = E \cdot J_1 \cdot \cos \varphi_1 + E \cdot J_2 \cdot \cos \varphi_2 + E \cdot J_3 \cdot \cos \varphi_3 + \dots$$

Hebt man das allen Gliedern gemeinsame E weg, so erhält man:

$$J \cdot \cos \varphi = J_1 \cdot \cos \varphi_1 + J_2 \cdot \cos \varphi_2 + J_3 \cdot \cos \varphi_3 \quad . \quad . \quad 32)$$

Die Größen $J \cdot \cos \varphi$, $J_1 \cdot \cos \varphi_1$, $J_2 \cdot \cos \varphi_2$, $J_3 \cdot \cos \varphi_3$ sind aber die Wattkomponenten der Ströme.

Wir erhalten daher den Satz: Die Wattkomponente des Gesamtstromes ist gleich der Summe der Wattkomponenten der Einzelströme in den parallelen Zweigen. Dies führt zu dem beistehenden Diagramm der Ströme. (Vergl. Fig. 29.)

Für die wattlosen Komponenten der Ströme gilt der für die Wattkomponenten aufgestellte Satz im allgemeinen nicht. Er bleibt jedoch auch für die wattlosen Komponenten bestehen:

1. Wenn Strom- und Spannungskurven sämtlicher Ströme und Spannungen sinusidalen Verlauf besitzen.

2. Wenn die Kurvenform aller Ströme gleich und die Stromkurven keine Phasenverschiebung gegeneinander haben, in Fig. 29 also die Ströme sämtlich in eine Gerade zusammenfallen.

3. Wenn der Gesamtstrom nur in zwei Einzelströme zerfällt, von welcher der eine mit der Spannung gleiche Phase hat.

Nur auf den Fall 3., der z. B. bei einer Lampe mit parallel geschalteter Drosselspule in Frage kommt, wollen wir etwas näher eingehen.

Für die Momentanwerte der Stromstärke gilt der 1. Kirchhoffsche Satz, folglich ist:

$$i = i_D + i_L.$$

Hierin ist i_D die Stromstärke in der Drosselspule, i_L die Stromstärke in der parallel geschalteten Lampe. Quadriert man, um auf die effektiven Werte zu kommen, so ist:

$$i^2 = i_D^2 + i_L^2 + 2 i_D \cdot i_L.$$

Für die Momentanwerte gilt auch das Ohmsche Gesetz in seiner ursprünglichen Form, deshalb ist:

$$i_L = \frac{e_L}{w_L} = \frac{e}{w_L}, \text{ da } e_D = e_L = e \text{ ist.}$$

Somit wird:
$$i^2 = i_D^2 + i_L^2 + 2 \cdot i_D \cdot \frac{e}{w_L}$$

oder wenn man zu den Mittelwerten übergeht:

$$M(i^2) = M(i_D^2) + M(i_L^2) + \frac{2 M(i_D \cdot e)}{w_L}.$$

Bezeichnet man wieder die effektiven Werte durch große Buchstaben ohne Index, so wird:

$$J^2 = J_D^2 + J_L^2 + \frac{2 A_D}{w_L} \quad . \quad . \quad . \quad 33)$$

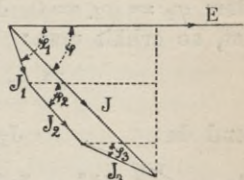


Fig. 29. Zusammensetzung der Stromstärke bei parallel geschalteten induktiven Widerständen.

Hiernach ist $A_D = (J^2 - J_D^2 - J_L^2) \frac{w_L}{2} \dots \dots \dots 34)$

Kennt man den induktionsfreien Widerstand n_L , und erleidet derselbe nicht durch Temperaturänderungen merkliche Änderungen, so kann man aus der Messung der drei Stromstärken J , J_D und J_L und der Größe des bekannten induktionsfreien Widerstandes w_L die Effektaufnahme des induktiven Widerstandes bestimmen. Man nennt dieses Verfahren der Effektmessung in induktiven Widerständen die Methode der drei Ampèremeter.

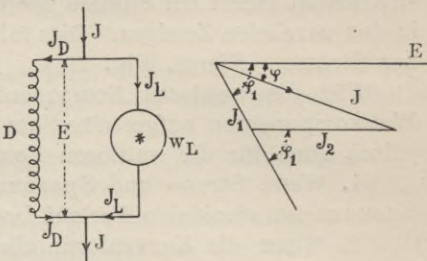


Fig. 30. Drosselspule (D), einem induktionsfreien Widerstände (w_L) parallel geschaltet.

Beachtet man das nebenstehende Diagramm (Fig. 30), in dem $\varphi_2 = \varphi_L = 0$, J_2 parallel E ist, so erhält man:

$$J^2 = J_D^2 + J_L^2 + \frac{2 J_D \cdot E}{w_L} \cdot \cos \varphi_1$$

und da: $J_D \cdot E \cdot \cos \varphi_1 = A_D$ ist, wie oben

$$A_D = \frac{w_L}{2} (J^2 - J_L^2 - J_D^2) \text{ und } A_D = E \cdot \frac{J^2 - J_D^2 - J_L^2}{2 J_L} \dots \dots \dots 35)$$

da $E = J_L \cdot w_L$ ist.

7. Die Drosselspulen als Beispiele für induktive Widerstände.

Von diesen soeben hier mitgeteilten Formeln und Konstruktionen wird besonders häufig bei der Bestimmung der sogenannten Drosselspulen Gebrauch gemacht.

Die Drosselspulen sind Spulen mit geteilten, magnetisch ungeschlossenen Eisenkernen, also Elektromagneten mit hoher Selbstinduktion und geringem Widerstande, die an Stelle der induktionsfreien Widerstände als Vorschaltwiderstände oder als zu Beleuchtungskörpern (Bogen- oder Glühlampen) parallel geschaltete Widerstände in Wechselstromkreisen vielfach verwendet werden.

Beträgt die Betriebsspannung E , und ist die Spannung, deren der mit Wechselstrom zu betreibende Apparat bedarf, gleich e , so würden, wenn man durch einen induktionsfreien Vorschaltwiderstand w den Spannungsabfall $E - e$ herbeiführen wollte, $(E - e) \cdot i = i^2 \cdot w$ Watt im Vorschaltwiderstande nutzlos in Wärme verwandelt werden müssen.

Verwendet man dagegen eine Drosselspule, deren scheinbarer Widerstand

$$w = \sqrt{w^2 + L^2 \cdot \omega^2}$$

ist, so ist der Spannungsabfall auch

$$i \cdot w = E - e.$$

Der Verlust an elektrischer Energie aber beträgt nur wenig mehr als $i \cdot w$, und w ist stets viel kleiner als w .

Will man z. B. von einem Wechselstromkreise aus, in dem der effektive Spannungsunterschied 50 Volt beträgt, eine Wechselstrombogenlampe speisen, die für 6 Ampère nur 28 bis 30 Volt Klemmenspannung beansprucht, so müßten in einem vorgeschalteten induktionsfreien Widerstande $50 - 30 = 20$ Volt Spannung verbraucht und $20 \cdot 6 = 120$ Watt nutzlos in Wärme umgesetzt werden, während in der Lampe selbst nur $30 \cdot 6 = 180$ Watt nutzbringend verwendet werden. Benutzt man anstatt eines induktionsfreien Widerstandes eine Drosselspule mit großer Selbstinduktion, so wird die in der Spule entwickelte elektromotorische Gegenkraft der Selbstinduktion stromschwächend wirken, und der Energieverbrauch in dieser Spule braucht nicht mehr als etwa 40 bis 60 Watt zu betragen, weil nur ein Verbrauch für die mit der Ummagnetisierung des Eisens unvermeidlich verknüpften Verluste durch Hysteresis, Wirbelströme usw. stattfindet. Der Widerstand der Wickelung ist meist so gering, daß die in ihm verbrauchte Stromwärme außer Betracht gelassen werden kann. Außerdem wirkt die Drosselspule selbsttätig regelnd auf die Spannung ein. Wächst z. B. die Stromstärke, so wird die Selbstinduktion vergrößert, weil mehr Kraftlinien erzeugt werden, dadurch aber tritt eine stärkere Schwächung ein als vorher.

Zweckmäßiger noch als die Verwendung von Drosselspulen in Hintereinanderschaltung mit Bogenlampen ist in manchen Fällen der Gebrauch kleiner Bogenlampentransformatoren, deren Primärstromkreis man von der Wechselstromleitung abzweigt, und in deren sekundären Stromkreis man die Bogenlampen mit einem kleinen Vorschaltwiderstand legt.

Die Richtigkeit dieser Behauptung geht z. B. aus folgendem hervor:

Die Betrachtung, daß man in Drosselspulen ohne wesentlichen Energie-Aufwand eine größere elektromotorische Gegenkraft erzeugen kann, hat dazu geführt, solche Spulen auch zu verwenden, um nur eine Lampe brennen zu lassen, also um z. B. bei 120 Volt Betriebsspannung 90 Volt aufzunehmen. Man sagte, die in der Drosselspule verzehrte Arbeit komme nicht in Betracht gegenüber der in der Lampe selbst aufgewendeten, und jedenfalls ist eine solche Drosselspule viel ökonomischer, als wenn man gewöhnlichen Widerstand vorschalten würde. Allein hierbei ist ein Punkt übersehen worden. Allerdings ist die in der Drosselspule verzehrte Arbeit gering, aber vom Netz wird der volle Strom für eine Lampe entnommen, mit dem man in

Hintereinanderschaltung drei Lampen speisen könnte. Oder anders gesagt: würde man mit solchen Drosselspulen drei Lampen von je 10 Ampère in Parallelschaltung an das Netz anschließen, so würde man damit dem Netz 30 Ampère entnehmen; schaltet man dagegen die drei Lampen hintereinander, so braucht man nur 10 Ampère dem Netz zu entnehmen. Die Drosselspulen konsumieren wattlosen Strom. Der wattlose Strom verbraucht keine Arbeit, aber er belastet das Netz und die Maschinen unnötiger Weise. Wir müssen ihn daher als einen Nachteil betrachten, den man tunlichst vermeiden muß.

Hierzu gibt es nun bei der Bogenlichtbeleuchtung ein ausgezeichnetes Mittel in den Bogenlampentransformatoren, die nicht teurer sind als die Drosselspulen. Für eine 9-Ampère-Lampe, die mit

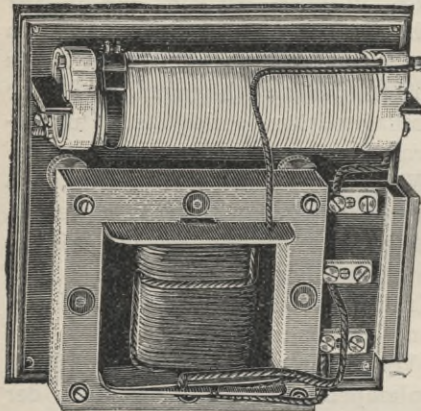


Fig. 31. Transformator nebst Vorschaltwiderstand für eine Bogenlampe von Siemens & Halske.

30 Volt brennt, wird der Strom durch einen kleinen Transformator von 120 auf etwa 40 Volt umgeformt, und 10 Volt hiervon werden von einem kleinen Beruhigungswiderstande aufgenommen. Man könnte auch hier eine Drosselspule verwenden, allein dem stehen im allgemeinen die höheren Kosten im Wege. Man transformiert also von 120 auf 40 Volt und braucht daher vom Netz für die 9-Ampère-Lampe nur etwa 3 Ampère zu entnehmen. Hat man zwei Lampen, so kann man diese parallel vom Transformator abzweigen, man entnimmt dann aus dem Netz

6 Ampère. Man hat auf diese Weise beim Wechselstrom und Drehstrom ein bequemes Mittel, jede Lampe für sich brennen zu lassen, ohne dabei erhebliche Energie zu verschwenden, und wird sich dieses Mittels bedienen, wo man nur einzelne Lampen braucht, während man in den Fällen, wo man dauernd eine größere Anzahl von Lampen gleichzeitig brennt, die Lampen einfach hintereinander schalten wird. Hinsichtlich der Teilbarkeit des Lichtes ist der Wechselstrom dem Gleichstrom somit tatsächlich etwas überlegen.

Obenstehende Abbildung (Fig. 31) zeigt einen solchen kleinen Transformator nebst Vorschaltwiderstand für eine Wechselstrombogenlampe in einer Ausführung, die von Siemens & Halske vielfach verwendet worden ist.

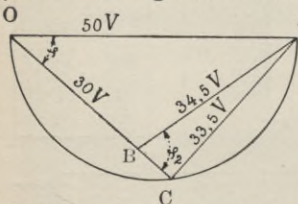
Bei Beleuchtungseinrichtungen mit zahlreichen hintereinander geschalteten Lampen, die mit Wechselstrom betrieben werden, wird

8. Bestimmung einer Drosselspule, die vor eine Bogenlampe geschaltet wird.

In untenstehendem Diagramm (Fig. 34) ist der beispielsweise von uns behandelte Fall, daß eine Wechselstrombogenlampe und eine Drosselspule hintereinander geschaltet sind, graphisch dargestellt. OA ist die gesamte EMK, also im vorliegenden Beispiele im Maßstabe der Volt (OA = E) 50 Volt. Über dieser Linie schlagen wir einen Halbkreis und konstruieren in diesem ein rechtwinkliges Dreieck. Wir wählen die von O ausgehende Kathete

$$\overline{OC} = \overline{OB} + \overline{BC} = E_1 + E_2 = E_1 + w_2 \cdot J,$$

wobei E_1 die Spannung ist, mit der die Bogenlampe brennen soll (d. i. im allgemeinen etwa 30 Volt), und $w_2 J$ die im Ohmschen



Widerstände w_2 der Drosselspule verbrauchte EMK. J ist die durch die Lampe fließende Stromstärke, also z. B. 6 Amperè.

Die andere Kathete CA ist die Selbstinduktion $L_2 \cdot \omega \cdot J$. Alsdann ist AB die zur Überwindung der Impedanz der Drosselspule erforderliche EMK E_2 .

Fig. 34. Bestimmung einer Drosselspule, die vor eine Wechselstrombogenlampe geschaltet werden soll.

Der Winkel φ_2 ist die Phasenverschiebung, um die der Strom in der Drosselspule hinter der EMK zurückbleibt; φ ist der Winkel, um welchen der Strom infolge der Einschaltung des ganzen Systems hinter der Spannung zurückbleibt.

Da nach dem Cosinussatze der Trigonometrie

$$\overline{AB}^2 = \overline{OA}^2 + \overline{OB}^2 - 2 \overline{OA} \cdot \overline{OB} \cos \varphi$$

ist, so folgt:

$$\cos \varphi = \frac{\overline{OA}^2 + \overline{OB}^2 - \overline{AB}^2}{2 \overline{OA} \cdot \overline{OB}} = \frac{E^2 + E_1^2 - E_2^2}{2 E \cdot E_1} \quad . \quad 36)$$

Auf dieselbe Weise findet man:

$$\cos \varphi_2 = \frac{E^2 - E_1^2 - E_2^2}{2 E_1 \cdot E_2} \quad . \quad . \quad . \quad 37)$$

Ferner ist auch:

$$\text{tang } \varphi_2 = \frac{L_2 \omega}{w_2} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 38)$$

In dem Teil des Stromkreises, der keine Selbstinduktion enthält, ist die verbrauchte Energie $\frac{E_1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{J}{\sqrt{2}}$, weil hier kein Phasenunterschied zwischen Strom und Spannung stattfindet.

In der Drosselspule ist die verbrauchte Energie $\frac{E_2}{\sqrt{2}} \cdot \frac{J}{\sqrt{2}} \cos \varphi_2$.

Die Nenner $\sqrt{2}$ beziehen sich darauf, daß wir, um die verbrauchte Energie zu erhalten, die quadratischen Mittelwerte¹⁾ benutzen müssen.

Die im ganzen Stromkreise verbrauchte Energie ist

$$\frac{E}{\sqrt{2}} \cdot \frac{J}{\sqrt{2}} \cdot \cos \varphi.$$

Kehren wir nun zum Zahlenbeispiel zurück, so ist $\frac{E}{\sqrt{2}} = 50$ Volt,

$\frac{E_1}{\sqrt{2}} = 30$ Volt, $\frac{J}{\sqrt{2}} = 6$ Ampère. Sollen aber im ganzen Strom-

kreise bei 6 Ampère Stromstärke nur 220 Watt, und zwar 180 Watt in der Bogenlampe, 40 Watt in der Drosselspule, verbraucht werden, so muß:

$$220 = 50 \cdot 6 \cdot \cos \varphi, \quad \cos \varphi = \frac{220}{300}, \quad \varphi = 43^\circ$$

sein. Wir tragen also in Fig. 34 unter dem Winkel von 43° die Linie OC an und machen $OB = 30$ Volt. Dann ist $BC = 7$, mithin der Ohmsche Widerstand der Drosselspule $w_2 = \frac{7}{6} = 1,2$ Ohm. Die

Größe \overline{AC} ergibt sich aus der Zeichnung zu 33,5. Daraus kann man den Koeffizienten der Selbstinduktion der Drosselspule, die Größe L_2 , bestimmen. Nehmen wir an, daß der Wechselstrom in 1 Sekunde 66 volle Perioden macht, so ist $\omega = 2\pi \cdot 66 = 414,7$.

Ferner ist nach Formel 37:

$$\cos \varphi_2 = \frac{50^2 - 30^2 - 34,5^2}{2 \cdot 30 \cdot 34,5}, \quad \text{somit: } \varphi_2 = 78\frac{1}{2}^\circ,$$

und (nach Gleichung 38):

$$L_2 = \frac{W_2}{\omega} \cdot \tan \varphi_2 = \frac{1,2}{414,7} \cdot \tan 78\frac{1}{2} = 0,014 \text{ Henry.}$$

9. Beispiel einer Drosselspule, die einer Glühlampe parallel geschaltet ist.

Wir behandeln ferner als Beispiel den Fall der Parallelschaltung einer Glühlampe und einer Drosselspule in einem Wechselstromkreise mit konstanter Stromstärke.

Die Glühlampe habe einen Widerstand $w_2 = 2$ Ohm, die Drosselspule einen Selbstinduktionskoeffizienten von $L_1 = 0,02$ Henry; die unveränderliche Stromstärke im ungeteilten Stromkreise betrage 10 Ampère; ω sei = 1000. Es sollen die Stromstärken in den beiden Zweigen und der Spannungsunterschied E an den beiden Enden der Stromverzweigung bestimmt werden.

¹⁾ Vergl. Kapitel I, 7., S. 12.

3. Kapitel.

Wechselstromkreis mit Kapazität und Widerstand.

1. Ein Kondensator in einem Wechselstromkreis.

Wenn wir zwei die Elektrizität leitende Flächen parallel anordnen und durch eine isolierende Schicht voneinander trennen, so bildet diese Vorrichtung einen Kondensator. Eine Franklinsche Tafel, eine Leydener Flasche, ein konzentrisches Kabel, ein in ein leitendes Mittel eingebettetes isoliertes Kabel, zwei in freier Luft parallel geführte zur Hin- und Rückleitung eines Stromes dienende Drähte bilden somit Kondensatoren.

Das Eigentümliche eines solchen Kondensators liegt darin, daß gewisse Elektrizitätsmengen von gleicher Größe, aber entgegengesetzten Vorzeichens auf den Belegen, d. h. auf den beiden

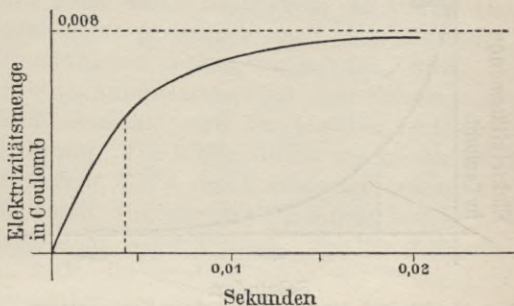


Fig. 36. Verlauf der Ladung eines Kondensators.

Seiten der isolierenden Schicht, angehäuft werden müssen, damit diese beiden Belege eine gewisse Potentialdifferenz erlangen.

Die Erhöhung der Potentialdifferenz ist der Menge der zuströmenden Elektrizität proportional. Die Elektrizitätsmenge, die erforderlich ist, um einen Spannungsunterschied von 1 Volt zwischen den Belegen hervorzurufen, heißt die Kapazität des Kondensators. Die Kapazität hängt von der Größe und geometrischen Form des Kondensators und von der Dicke und der Beschaffenheit (der Dielektrizitätskonstanten) des isolierenden Zwischenmittels ab.

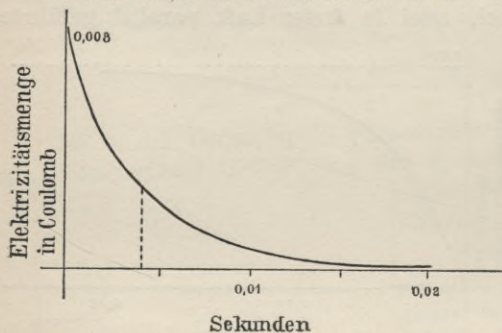
Nehmen wir an, ein Widerstand W und ein Kondensator, dessen Kapazität C betrage, seien hintereinander geschaltet und werden plötzlich an eine Elektrizitätsquelle angelegt, die einen konstanten Spannungsunterschied hervorruft. Alsdann beginnt der Kondensator sich zu laden. Die Elektrizitätsmengen, die der Kondensator nach und nach aufnimmt, sind für ein bestimmtes Beispiel ($W = 100$ Ohm, $C = 4$ Mikروفarad, Spannung 200 V) in Fig. 36 als Funktion der Zeit

bildlich dargestellt. Während der kurzen Zeit der Ladung fließt scheinbar ein Strom, ein Ladestrom, von Maxwell auch Verschiebungsstrom genannt, durch die isolierende Zwischenschicht hindurch.

Wenn wir hierauf die bisher an die beiden Pole der Elektrizitätsquelle angelegten Drähte miteinander verbinden, so beginnt der Kondensator sich zu entladen; es fließt nunmehr ein dem Ladestrom entgegengesetzt gerichteter Entladestrom durch die Drähte. Die Fig. 37 zeigt die Abnahme der in dem Kondensator aufgespeicherten Elektrizitätsmengen zu den verschiedenen Zeitmomenten nach Beginn der Entladung.

Die beiden Kurven, die bei der Ladung und bei der Entladung erhalten werden, sind wahrscheinlich nahezu kongruent und nur der Lage nach verschieden.

Wirkt eine unveränderliche EMK auf einen Kondensator von



der Kapazität C , so hört der dem Kondensator zufließende Strom auf, sowie die Ladung beendet ist, d. h. wenn der Potentialunterschied zwischen den beiden Belegen gleich der wirksamen EMK e geworden ist. Die Ladung Q ist dann:

$$Q = C \cdot e \dots \dots 1)$$

Fig. 37. Verlauf der Entladung eines Kondensators.

Wenn sich aber die EMK der Elektrizitätsquelle ändert, so ändert sich auch die Ladung, und der Strom beginnt wieder zu fließen.

Verbindet man einen Kondensator durch Leiter mit einer Elektrizitätsquelle, die einen Wechselstrom hervorzubringen imstande ist, also eine nach einer Sinusfunktion sich ändernde EMK erzeugt, so wird der Kondensator geladen, entladen, entgegengesetzt geladen, wieder entladen u. s. f. Durch die Leitung fließt alsdann ein verhältnismäßig schwacher Wechselstrom, dessen Stärke von der Größe der EMK der Elektrizitätsquelle, von der Kapazität des Kondensators und von dem Widerstande abhängt.

Der jeweilige Spannungsunterschied der beiden Belege des Kondensators wird sich alsdann von der Klemmenspannung der Elektrizitätsquelle nur um den geringfügigen Betrag unterscheiden, der gleich dem Spannungsverluste ist, den der Ladungsstrom und Entladungsstrom in dem Widerstande der Leitungen veranlaßt.

Wenn der Spannungsunterschied der beiden Belege des Kondensators seinen höchsten positiven Wert erreicht, wird der Ladestrom

null. Unmittelbar darauf beginnt der Entladestrom zu fließen, und die positive Spannung nimmt mehr und mehr ab.

Wenn der Entladestrom seine größte Stärke erreicht hat, ist der Spannungsunterschied der beiden Belege null geworden. Während hierauf der Entladestrom an Stärke mehr und mehr abnimmt, wächst die negative Ladung und damit der dem vorigen entgegengesetzte Spannungsunterschied der Belege mehr und mehr. Wenn die Kondensatorspannung ihr negatives Maximum erreicht hat, hört der negativ gerichtete Strom auf zu fließen und ändert sein Vorzeichen. Der Kondensator beginnt seine negative Ladung abzugeben und ruft einen positiven Strom hervor, der sein Maximum erreicht, wenn der Kondensator wieder vollständig entladen ist. — Diese Vorgänge wiederholen sich nun in jeder vollen Periode des Wechselstromes in derselben Weise je einmal.

Ändert sich der Strom nach einer Sinuswelle, so ändert sich auch die Ladung des Kondensators periodisch nach einer Funktion, die praktisch als eine Sinusfunktion angesehen werden kann. In der Zeit, zu welcher der Spannungsunterschied der Kondensatorbelege das positive Maximum erreicht, wird der positive Ladestrom null und wechselt seine Richtung. Die Welle, durch welche die nach einer Sinusfunktion sich ändernde EMK der Kondensatorbelege dargestellt werden kann, eilt somit vor der Welle, durch welche die Änderung des Stromes dargestellt werden kann, um die Zeitdauer einer Viertelperiode voran, d. h. sie erreicht schon $\frac{1}{4}$ Wellenlänge näher nach dem Ausgangspunkte der Bewegung hin die positiven und negativen Maxima und die Nullwerte.

Wenn man die Darstellung periodischer Änderungen durch die Projektion rotierend gedachter Vektoren wählt, eilt somit der Vektor, den die Kondensatorspannung darstellt, vor dem Vektor, der den Strom darstellt, um 90^0 voraus.

Während die EMK der Selbstinduktion hinter der Nutzspannung $w \cdot J$ um 90^0 zurückbleibt, eilt hingegen die Kondensatorspannung um einen Quadranten voraus.

Die Wirkungen der Selbstinduktion und die einer Kapazität in einem Wechselstromkreise sind somit genau entgegengesetzt gerichtet.

Wollen wir die wirkliche Betriebsspannung für einen Stromkreis suchen, der Widerstand und Selbstinduktion in Hintereinanderschaltung enthält, so tragen wir an eine Strecke von der Länge $OM = w \cdot J$, die der EMK der Selbstinduktion entgegengesetzt gerichtete Komponente der Betriebsspannung $\overline{MN} = \omega \cdot L \cdot J$ am Ende der vorigen Richtung senkrecht in der Drehrichtung des Vektors an. Dann repräsentiert die Hypotenuse ON nach Phase (Richtung) und

Größe die zur Überwindung des Widerstandes und der Selbstinduktion erforderliche Spannung, damit der Strom J entsteht.

Wenn jedoch in einem Wechselstromkreise Ohmscher Widerstand und eine Kapazität hintereinander geschaltet sind, trägt man in M an die Gerade $OM = w \cdot J$, die nach Größe und Richtung Intensität und Phase der Nutzspannung darstellt, eine Senkrechte MN entgegen

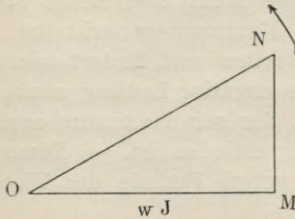


Fig. 38. Widerstand und Selbstinduktion in Hintereinanderschaltung.

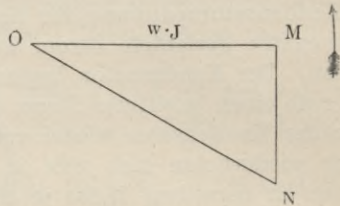


Fig. 39. Widerstand und Kapazität in Hintereinanderschaltung.

der Drehrichtung des Vektors auf, die der Kondensatorspannung entgegengesetzt ist. Dann ist \overline{ON} die Betriebsspannung, die erforderlich ist, um in dem Widerstand und Kapazität enthaltenden Stromkreise die Stromstärke J hervorzubringen. Die Fig. 38 stellt das Diagramm für Widerstand und Selbstinduktion, und Fig. 39 für Widerstand und Kapazität dar.

2. Eine mechanische Analogie des Kondensators.

Da erfahrungsmäßig diejenigen, welche sich mit der Lehre von den Wechselströmen zu beschäftigen beginnen, es schwierig finden das Vorzeichen des Phasenunterschiedes zwischen Strom und Kondensatorspannung richtig zu begreifen, so wählen wir ein einfaches Beispiel aus der Mechanik,¹⁾ das zur Veranschaulichung der Vorgänge sehr geeignet erscheint. (Vergl. Fig. 40.)

Den Kondensator denken wir uns durch ein mit Luft gefülltes Gefäß G dargestellt, in welchem die Luft durch eine Flüssigkeitsmenge abgeschlossen ist. Ein Kolben P , der etwa durch eine bewegliche Stange und Exzenter mit einer rotierenden Welle verbunden ist, bewegt sich periodisch in dem zylindrischen Halse des Gefäßes auf und nieder und schiebt dabei die Flüssigkeit vor sich her.

Die Ladung des Kondensators wird dann durch die in den kugelförmigen Hohlraum eindringende Flüssigkeit, der elektrische Strom durch den Strom der in den Hohlraum eindringenden oder aus ihm ausfließenden Flüssigkeit und der Spannungsunterschied der Kondensator-

¹⁾ Dasselbe findet sich zuerst bei Bedell und Crehore, »Alternating Currents«, New-York 1893, deutsch von A. Buchener, Berlin, J. Springer, S. 230.

satorbelege durch den Druck der im Gefäße enthaltenen Luft dargestellt. Der Einfachheit wegen nehmen wir an, daß der Druck der eingeschlossenen Luft gleich dem Drucke außerhalb des Gefäßes sei, wenn sich der Kolben in der mittleren Stellung P befindet.

Wenn der Kolben auf seinem Wege in der Richtung von P'' nach P' sich in der Stellung P befindet, ist die Ladung null, da der Druck im Inneren des Gefäßes gleich dem äußeren Drucke ist, der positive Strom ist in diesem Zeitpunkte am stärksten, weil der Kolben durch seine Gleichgewichtslage mit der größten Geschwindigkeit hindurchgeht. Der Punkt H auf der Wellenlinie I der EMK des Kondensators und der senkrecht darüber liegende Punkt K auf der Linie des Stromes (Linie II) entsprechen diesem Augenblicke. (Vergl. Fig. 41.)

Ist dann der Kolben in seiner höchsten Lage P' angekommen, in der er dann umkehrt, so entspricht dies dem Punkte n auf der Stromkurve. Die Ladung des Kondensators und die Spannung desselben ist dann am größten, es entspricht dies dem Punkte m. Die Welle Hm geht nach unten, weil die Kondensatorspannung einen dem positiven Strom entgegengesetzt fließenden Strom veranlassen würde, also einer entgegengesetzt gerichteten EMK entspricht.

Während der Kolben sich auf dem Wege P'P nach außen bewegt, wirkt der Druck des eingeschlossenen Gases in derselben Richtung, in der der Flüssigkeitsstrom fließt, daher befinden sich

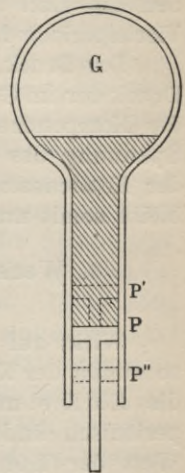


Fig. 40. Veranschaulichung der Ladung und Entladung eines Kondensators durch einen Wechselstrom.

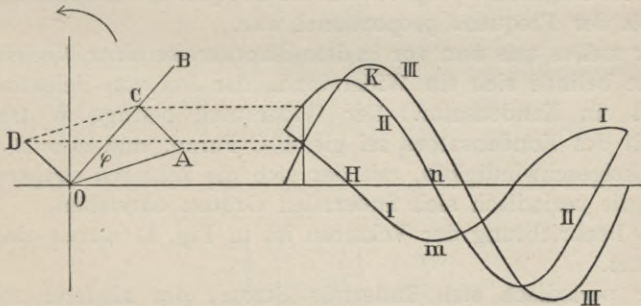


Fig. 41. Ein Kondensator in einem Wechselstromkreise.

die entsprechenden Kurventeile der Spannungskurve I und der Stromkurve II unterhalb der Abszissenachse auf der negativen Seite. Wenn der Strom sein negatives Maximum erreicht, der Kolben mit maximaler Geschwindigkeit durch die Gleichgewichtslage hindurchgeht, ist die

Kondensatorspannung wieder null geworden und nimmt weiterhin positive Werte an, d. h. sie wirkt der negativen Richtung des Stromes entgegen.

Man erkennt aus diesen Wellenlinien in der Tat, daß der Druck, den die Luft ausübt, d. h. die Kondensatorspannung I, um eine Viertelperiode früher die nämliche Phase besitzt wie der Strom II.

Der Druck, der auf den Kolben ausgeübt werden muß, um den Druck der im Gefäße eingeschlossenen Luft zu überwinden, entspricht der Komponente der EMK, die aufgewendet werden muß, um die Spannung des Kondensators zu überwinden; diese EMK ist daher der Kondensatorspannung gleich, aber entgegengesetzt gerichtet, sie bleibt somit um eine Viertelperiode hinter dem Strome zurück.

3. Wechselstromkreis mit Widerstand und Kapazität in Hintereinanderschaltung.

Wirkt auf einen Kondensator von der Kapazität C eine EMK e, so nimmt der Kondensator eine elektrostatische Ladung Ce an. Wenn die EMK e mit einer Frequenz \sim nach einer Sinusfunktion sich periodisch ändert, so ist $4 \sim$ der mittlere und $2 \pi \sim$ der höchste Wert der Ladungen und Entladungen (vergl. Kap. 1, 7., S. 12). Alsdann ist:

$$i = 2 \pi \sim C e \dots\dots\dots 2)$$

die Stärke des Kondensatorstromes. Dieser Strom ist in Quadratur zur EMK; er eilt um 90° der Spannung voraus. Die Größe

$$\frac{e}{i} = \frac{1}{2 \pi \sim C} \dots\dots\dots 3)$$

ist die Reaktanz des Kondensators, auch Kondensanz genannt. Dieselbe ist umgekehrt proportional der Frequenz, während die Selbstinduktion der Frequenz proportional war.

Wir stellen uns nun vor in dem Stromkreise einer Wechselstrommaschine befinde sich ein Widerstand, der frei von Selbstinduktion ist, und ein Kondensator. Der Widerstand betrage W Ohm, die Kapazität des Kondensators sei gleich C Farad, und $\omega = 2 \pi \sim$ sei die Winkelgeschwindigkeit, mit der sich die Vektoren drehen, durch die wir die periodisch sich ändernden Größen darstellen.

Die Drehrichtung der Vektoren ist in Fig. 41 durch einen Pfeil angedeutet.

Der periodisch sich ändernde Strom, der alsdann scheinbar durch die isolierende Zwischenschicht, das Dielektrikum des Kondensators, hindurchfließt, der Ladestrom oder Verschiebungsstrom (nach Maxwell) sei J, und ferner sei E_c die Potentialdifferenz des Kondensators. Wenn wir dann E_c als Vektor OD in irgend einer Richtung in bestimmtem Maßstabe abtragen, so muß der Strom OB,

abgetragen im Maßstabe, den wir für die Ampère wählen, um 90^0 in der Drehung hinter dem Vektor OA zurückbleiben, denn eine volle Umdrehung um 360^0 entspricht einer ganzen Welle in der vorhergehenden Darstellung, ein Phasenunterschied von einer Viertelwelle gehört somit zu einem Winkel von 90^0 . Da der induktionsfreie Widerstand im Stromkreise W beträgt, entspricht dem durch W fließenden Strom J ein Spannungsverlust von der Größe WJ, der mit dem Strom in gleicher Phase ist, also mit ihm auf demselben Vektor liegt. Wir tragen daher auf der zu OD senkrechten Geraden OB noch eine zweite Strecke OC = WJ ab. — Um nun die EMK der Elektrizitätsquelle E_G zu finden, berücksichtigen wir, daß sich E_G aus zwei Komponenten zusammensetzt, deren eine der Spannungsverlust WJ, deren andere die EMK ist, die erforderlich ist, um die Potentialdifferenz des Kondensators E_c zu überwinden. Diese letzte Komponente muß somit gleich OD, aber dieser entgegengesetzt gerichtet sein. Wir machen also die Strecke CA, die OD entgegengesetzt gerichtet ist, gleich OD; $\overline{CA} = \overline{OD}$. Die Strecke OA ist alsdann die EMK der Wechselstrommaschine; diese EMK ist erforderlich, um in dem Widerstande W den Strom J und am Kondensator gleichzeitig die Spannung E_c hervorzurufen.

Man erkennt sofort, daß:

ist.
$$\overline{OA} = \sqrt{\overline{OC}^2 + \overline{CA}^2}$$

Hierin ist nun \overline{CA} an Größe gleich der Kondensatorspannung E_c und diese ist nach dem, was wir in Abschn. 2 dieses Kapitels festgesetzt haben:

$$E_c = \frac{J}{\omega C} \dots \dots \dots 4)$$

\overline{OC} aber hat bekanntlich den Wert $W \cdot J$. Man findet somit:

$$E_G = \sqrt{\left(\frac{J}{\omega \cdot C}\right)^2 + (J \cdot W)^2} = J \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{\omega \cdot C}\right)^2 + W^2} \dots \dots 5)$$

Hiernach ist:

$$J = \frac{E_G}{\sqrt{\left(\frac{1}{\omega \cdot C}\right)^2 + W^2}} \dots \dots \dots 6)$$

Die Wurzelgröße stellt somit die Impedanz, den scheinbaren Widerstand des Wechselstromkreises dar, in dem ein Widerstand W und ein Kondensator hintereinander an einen Wechselstrom liefernden Apparat angeschlossen sind. Man bemerkt, daß in diesem Falle der Strom, der scheinbar durch das isolierende Zwischenmittel fließt, der EMK der Maschine um einen Phasenwinkel φ vorausseilt. Nach

der Fig. 41 kann φ leicht aus der folgenden Gleichung bestimmt werden:

$$\text{tang } \varphi = \frac{\overline{CA}}{\overline{OC}} = \frac{\overline{J}}{\omega \cdot C} = \frac{1}{\omega \cdot C \cdot W} \quad 7)$$

Die Größe $\frac{1}{\omega C}$ wird die Reaktanz des Kondensators oder

Kapazitätsreaktanz genannt.

Zahlenbeispiel. Ein konzentrisches Kabel von 4,9 *km* Länge und 220 *qmm* Querschnitt besteht aus einem inneren Leiter von 2 *cm* Dicke, der innere Radius des den äußeren Leiter bildenden konzentrischen Hohlzylinders betrage 1,5 *cm*. Die Dielektrizitätskonstante des zwischenliegenden Isolationsmaterials betrage 3,0. Alsdann beträgt die Kapazität *C* dieses als Kondensator wirkenden Kabels ungefähr $C = 2$ Mikrofarad = 0,000 002 Farad.¹⁾ Die Zahl der Perioden in der Minute betrage 3000; dann ist $\omega = 50$ und die Winkelgeschwindigkeit der Vektoren im Diagramm $\omega = 2\pi \cdot \omega = 314$. Die EMK der Stromquelle sei 2000 Volt. Dann ist nach Gleichung 4:

$$J = \omega \cdot C \cdot E_c = 314 \cdot 0,000\,002 \cdot 2000 = 1,26 \text{ Ampère.}$$

Es wird also, wenn nur das Kabel allein an die Wechselstrommaschine angeschlossen ist, ein Strom von ungefähr $1\frac{1}{4}$ Ampère scheinbar fortwährend durch die Isolationsschicht des Kabels hindurchfließen.

Unzweifelhaft treten durch die wiederholte Ladung, Entladung, entgegengesetzte Ladung und Entladung u. s. f. eines Kondensators molekulare Arbeitsleistungen in der isolierenden Zwischenschicht desselben, in dem Dielektrikum, ein. Das Dielektrikum verbraucht bei rasch aufeinanderfolgenden Ladungen und Entladungen elektrische Energie durch sogenannte dielektrische Hysterisis. Die verbrauchte elektrische Energie wird in Wärme umgesetzt und bedeutet einen Verlust. Diese Energieverluste sind aber so gering, daß sie meist für die Praxis vernachlässigt werden können.

In elektrolytischen Zersetzungszellen wirkt die Polarisation ganz ähnlich wie eine Kapazität.

Auch übererregte Synchronmotoren wirken in einem Stromkreise wie eine Kapazität, die man einschaltet.

¹⁾ Vergl. Cl. Feldmann, Elektrotechn. Ztschr. 1892, S. 88.

stärke $\overline{OJ} = J_G$. Dann multipliziert man J_G mit W , mit dem Widerstande, und wählt für die Spannungen einen Maßstab; nach diesem macht man $\overline{OE}_N = J_G \cdot W$. Senkrecht dazu trägt man $E_C - E_s$ im Maßstabe der Volt auf und bildet das Rechteck; dann ist \overline{OF} die Spannung, die nötig ist, um den Wechselstrom J_G in dem Systeme hervorzurufen, welches aus Kondensator, Widerstand und Selbstinduktion besteht. Die Phasenverschiebung der EMK der Stromquelle \overline{OF} gegen den Strom wird im vorliegenden Falle durch den Winkel $E_N OF$ gemessen.

Die Phasenverschiebung der resultierenden EMK gegen die Stromstärke ergibt sich aus der Figur zu:

$$\tan \varphi = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega \cdot C}}{w} = \frac{x}{w}.$$

In einem Wechselstromkreis kann man demnach durch Veränderung der Selbstinduktion und der Kapazität die Phasendifferenz sich beliebig zwischen $+\frac{\pi}{2}$ und $-\frac{\pi}{2}$ ändern lassen.

Man hat eine Phasenvoreilung der EMK gegen die Stromstärke um nahe 90° , wenn die Selbstinduktion sehr groß ist.

Die Phasendifferenz wird dagegen $-\frac{\pi}{2}$, d. h. die EMK bleibt um nahe 90° hinter dem Strome zurück, wenn die Kapazität C sehr klein ist.

Für einen rein metallisch geschlossenen Stromkreis ist C unendlich groß.

Man erkennt sofort, daß, wenn $E_C = E_s$, $\omega L - \frac{1}{\omega C} = 0$, oder $\frac{1}{C \omega} = L \omega$, $C = \frac{1}{L \omega^2}$ wird, die Phasenverschiebung den Wert Null annimmt.

Wenn also die verzögernde Wirkung der Selbstinduktion ebenso groß ist, als die beschleunigende Wirkung der Kapazität, so sind der Strom in dem Widerstande und die EMK der Stromquelle in gleicher Phase, und die EMK ist das Produkt aus Stromstärke und Widerstand, wie bei Gleichstrom.

Diese Möglichkeit, die Selbstinduktion eines Stromkreises durch Hinzufügung eines oder mehrerer Kondensatoren völlig aufheben zu können, ist für verschiedene praktische Aufgaben von großer Bedeutung, weil sie gestattet, die EMK, die erforderlich ist, um in einem Wechselstromkreise eine bestimmte Stromstärke hervorzu- bringen, auf ein Minimum zu reduzieren.

Man erkennt aber auch, daß diese Aufhebung nur für ein bestimmtes ω besteht. Für jede Frequenz \sim ist somit ein anderes Verhältnis von Selbstinduktion und Kapazität erforderlich.

2. Elektrische Resonanz.

Man erkennt ferner, daß, während in den früher behandelten Fällen die EMK der Stromquelle immer größer sein mußte als die EMK der Selbstinduktion oder als die EMK des Kondensators, die Möglichkeit vorliegt, daß, wenn Kapazität und Selbstinduktion gleichzeitig in demselben Wechselstromkreise in Hintereinanderschaltung vorkommen, die EMK der Stromquelle kleiner sein kann als die EMK an den Klemmen des Kondensators oder als die EMK an den Klemmen des Teiles des Stromkreises, der mit Selbstinduktion behaftet ist.

Nach unseren Formeln (Kap. III, 3, S. 53) ist:

$$E_C = \frac{J_G}{C \omega} \dots \dots \dots 3)$$

und ferner ist die EMK der Stromquelle \overline{OF} in unserem Diagramm (Fig. 42)

$$\overline{OF} = \sqrt{(E_C - E_s)^2 + E_N^2} = \sqrt{\left(\frac{J_G}{C \omega} - J_G L \omega\right)^2 + (J_G \cdot W)^2} \quad 4)$$

Demnach ist das Verhältnis der EMK des Kondensators zur EMK der Stromquelle:

$$\frac{E_C}{\overline{OF}} = \frac{1}{C \omega \sqrt{\left(\frac{1}{C \cdot \omega} - L \omega\right)^2 + W^2}} = \frac{1}{\sqrt{(1 - CL\omega^2)^2 + C^2 \omega^2 W^2}} \quad 5)$$

Rechnet man die Größe unter dem Wurzelzeichen aus, so erhält man:

$$\frac{E_C}{\overline{OF}} = \frac{1}{\sqrt{1 - 2 \cdot C \cdot L \cdot \omega^2 + C^2 \cdot L^2 \cdot \omega^4 + C^2 \cdot \omega^2 \cdot W^2}} \quad 6)$$

Der Nenner dieses Bruches kann nun gleich, größer oder kleiner als 1 sein.

Der Radikand des Nenners wird gleich 1, wenn

$$2 CL\omega^2 = C^2 L^2 \omega^4 + C^2 \omega^2 W^2$$

oder wenn

$$C = \frac{2L}{W^2 + \omega^2 L^2} \dots \dots \dots 7)$$

ist.

Hat C einen größeren Wert, so wird der Nenner größer als 1, dann ist die EMK der Stromquelle größer als die des Kondensators. Hat aber C kleinere Werte als den durch Gleichung 7 gegebenen, so ist die Spannung des Kondensators größer als die EMK der Stromquelle. Gleichzeitig sieht man, daß dieser Wert von der Größe ω oder von der Frequenz des Wechselstromes von \sim abhängig ist.

Diese eigentümliche Erscheinung, die den Elektrotechnikern, die sich mit Wechselströmen beschäftigen, schon längere Zeit bekannt ist, führt den Namen Resonanzeffekt.

Die Kondensatorspannung ist der EMK der Stromquelle um den größten Betrag überlegen, es wird ein Maximum erreicht, wenn die Kapazität

$$C = \frac{L}{W^2 + \omega^2 L^2} \dots \dots \dots 8)$$

d. h. halb so groß ist als der in Gl. 7 angegebene kritische Wert.

Ein Stromkreis, in welchem W äußerst klein ist und für welchen der Gleichung 8 Genüge geleistet wird, kann von einem Strome von sehr erheblicher Stärke durchflossen werden, auch wenn die auf ihn wirkende EMK klein ist. In einem solchen Stromkreise findet eine fortdauernde Umwandlung von magnetischer in elektrische Energie und umgekehrt statt.

Hat man elektrische Schwingungen einmal eingeleitet, so bedarf es nur geringer EMKkräfte, um dieselbe zu erhalten. Die Ladung des Kondensators gleicht sich aus und erzeugt einen Strom, dieser Strom induziert in der Selbstinduktion eine entgegengesetzte EMK, die den Kondensator entgegengesetzt ladet. Die Erscheinung wiederholt sich nun im entgegengesetzten Sinne, und dieser Wechsel wiederholt sich periodisch. Allmählich wird die Amplitude dieser elektromagnetischen Schwingungen immer kleiner, weil doch der Widerstand W niemals völlig null ist, und daher Stromwärme entsteht, durch welche die Schwingungen gedämpft und die elektromagnetische Energie allmählich aufgezehrt wird.

Man erkennt sofort, daß die Resonanz eines Stromkreises stets nur für ein bestimmtes ω besteht.

Für $W = 0$ ist:

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{LC}} \quad \sim = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{1}{L \cdot C}}$$

Die Frequenz der elektrischen Schwingungen des Resonators ist um so größer, je kleiner L und C sind.

Für jeden Stromkreis gibt es aber auch eine gewisse Frequenz, bei welcher die Resonanzerscheinung eintreten muß, bei der Selbstinduktion und Kapazität sich gegenseitig aufheben.

Die Analogie mit den akustischen Resonanzerscheinungen ist ziemlich weitgehend. Vernachlässigt man, was bei kleinen Werten des Widerstandes W und bei größeren Werten von ω geschehen kann, W^2 gegen $L^2 \omega^2$, so erhält man nach Formel 8 die größte Resonanz, wenn $C = \frac{L}{L^2 \omega^2} = \frac{1}{L \omega^2}$ ist. Da (vergl. S. 8)

$$\omega = 2\pi \sim = \frac{2\pi}{T} \text{ ist, ergibt sich: } C = \frac{T^2}{4\pi^2 L} \text{ oder } T = 2\pi \sqrt{CL}.$$

Diese Schwingungsdauer der elektrischen Schwingung stimmt überein mit der Formel für die Schwingungsdauer eines elastischen Körpers, dessen Trägheitsmoment L und dessen Elastizitätskoeffizient $\frac{1}{C}$ ist. Ein solcher Körper würde, wenn eine schwingende Bewegung

von der Schwingungsdauer T in seiner Nähe bestände, durch Resonanz zum Mitschwingen veranlaßt werden und könnte unendlich lange fortschwingen, wenn nicht die Schwingungsenergie durch Luftwiderstand und innere Reibung allmählich in Wärme umgewandelt würde.

Eine Wechselstrommaschine bringe in einem Stromkreise eine unveränderliche Spannung von 100 Volt hervor. In diesem Stromkreise befinden sich zwei scheinbare Widerstände, zwei Impedanzen z_1 und z_2 , die teils von Kapazitäten (Kondensatoren), teils von Selbstinduktion (Induktionsspulen, Elektromagneten) herrühren,

$$z_1 = \sqrt{W_1^2 + \left(L_1 \omega - \frac{1}{C_1 \cdot \omega}\right)^2} = \sqrt{W_1^2 + x_1^2}$$

und

$$z_2 = \sqrt{W_2^2 + \left(L_2 \omega - \frac{1}{C_2 \cdot \omega}\right)^2} = \sqrt{W_2^2 + x_2^2}$$

in Hintereinanderschaltung.

Die einen Größen, gleichgiltig welche, können sich dabei auf den Apparat beziehen, den der Wechselstrom hervorbringt.

Die Impedanz z_2 soll auf verschiedene Weise zu dem Betrage 1 zusammengesetzt sein:

1. $z_2 = 1$ $W_2 = 1$ $x_2 = 0$ $C_2 = \infty$ $L_2 = 0$,
2. $z_2 = 1$ $W_2 = 0,6$ $x_2 = +0,8$ $C_2 = \infty$ $L_2 = 0,8$,
3. $z_2 = 1$ $W_2 = 0,6$ $x_2 = -0,8$ $C_2 = 0,8$ $L_2 = 0$.

W_1 mag so klein sein, daß z_1 sich in der Hauptsache auf x_1 reduziert.

Wir bestimmen alsdann für verschiedene Beträge von x_1 die Spannung E_2 , beziehentlich den (wegen der Konstanten z_2) proportionalen Strom J_2 in der Impedanz z_2

$$E_2 = \frac{E_1}{\sqrt{W_2^2 + (x_1 + x_2)^2}} \quad J_2 = \frac{E_1 \cdot z_2}{\sqrt{W_2^2 + (x_1 + x_2)^2}}$$

und tragen diese für verschiedene Werte von x_1 in Fig. 43 graphisch auf. Man bemerkt, daß die Kurve I symmetrisch ist, ihren Höchstwert für $x_1 = 0$ erreicht und mit wachsender positiver (Selbstinduktion) oder negativer Kapazität x_1 erst langsam und dann rascher, später wieder langsamer beiderseitig gleichmäßig abfällt.

Bei Kurve II, für welche $x_2 = + 0,8$ eine Selbstinduktion ist, tritt das Maximum für $x_2 = - 0,8$ ein, d. h. wenn die Selbstinduktion in der einen Impedanz z_2 durch eine gleich große Kapazität in der

anderen Impedanz z_1 gerade aufgehoben wird. Die Spannung erhebt sich um $\frac{2}{3}$ in diesem Maximum und wird wieder 100, wenn $x_2 = 2 \cdot - 0,8 = - 1,6$ geworden ist.

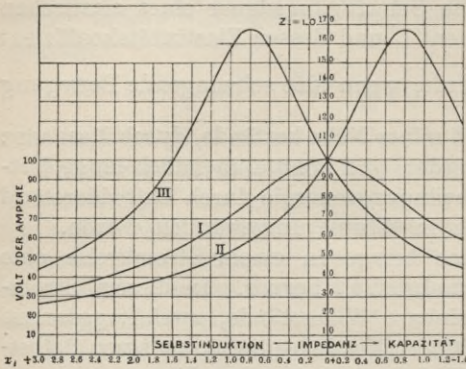


Fig. 43. Resonanzeffekt bei Hintereinanderschaltung von Selbstinduktion und Kapazität.

Die Kurve III bezieht sich auf einen Fall, in welchem $x_2 = - 0,8$ eine Kapazität ist. Das Maximum erstreckt sich wiederum auf 167 Volt und tritt ein, wenn $x_1 = - x_2 = + 0,8$ ist. Sonst ist, abgesehen von

dieser Verschiebung nach links, die Kurve III der Kurve II völlig kongruent. Jedesmal, wenn $x_1 + x_2 = 0$, wenn Strom und Spannung in z_1 phasengleich sind, tritt der Resonanzeffekt auf.

3. Selbstinduktion und Kapazität in Parallelschaltung.

Aus den Betrachtungen des vorhergehenden Paragraphen hat sich ergeben, daß in einem Wechselstromkreise das Auftreten von Selbstinduktion und das von Kapazität gerade entgegengesetzte Wirkungen ausübt. Die beiden Wirkungen konnten einfach voneinander subtrahiert werden, weil sie gerade entgegengesetzt gerichtet waren. (Vergl. S. 55.) Diesem Tatbestand wird einfach dadurch Rechnung getragen, daß jede im Stromkreise auftretende Kapazität als eine negative Selbstinduktion in die Rechnung und in die Konstruktion eingeführt wird.

Die zur Überwindung einer Selbstinduktion von der Größe L erforderliche EMK ist $J \cdot L \cdot \omega$ (vergl. S. 25, Gl. 6) und eilt dem Strome um 90° voraus. Die zur Überwindung der Spannung des Kondensators erforderliche EMK ist $\frac{J}{C \cdot \omega}$ und bleibt um 90° hinter dem Strome zurück; beide bilden mit der wirksamen EMK von der Größe $J \cdot W$, durch die der Strom den Widerstand zu durchfließen veranlaßt wird, je einen Winkel von $+ 90^\circ$ und $- 90^\circ$.

Für alle praktischen Fälle kann man daher $\frac{1}{C \omega}$ als eine negative Selbstinduktion, als eine Größe $- L' \omega$ auffassen.

In die Rechnung und in die Konstruktion führt man also einfach die Differenz $x = \frac{1}{C \omega} - L \omega$ ein. Ist $\frac{1}{C \omega} > L \omega$, so eilt der Strom der treibenden EMK voraus, ist $\frac{1}{C \omega} < L \omega$, so bleibt der Strom hinter der treibenden EMK zurück. Ist $\frac{1}{C \omega} = L \omega$, so sind Strom und treibende EMK in gleicher Phase, es herrscht Resonanz.

Die Tangente des Winkels φ , um den die Voreilung oder das Zurückbleiben stattfindet, ist:

$$\text{tang } \varphi = \frac{\left(\frac{1}{C \cdot \omega} - L \cdot \omega \right) \cdot J}{J \cdot W} = \frac{1}{C \cdot W \cdot \omega} - \frac{L \omega}{W} \dots 9)$$

Die treibende EMK der Elektrizitätsquelle ist:

$$E = J \cdot \sqrt{W^2 + \left(\frac{1}{C \cdot \omega} - L \cdot \omega \right)^2} \dots 10)$$

Der Wurzelwert ist die Impedanz z (vergl. Fig. 42, S. 55), welche bei Wechselströmen an Stelle des Ohmschen Widerstandes bei Gleichstrom tritt. Je nachdem also die Wirkung der Kapazität oder die der Selbstinduktion überwiegt, ersetzt man eine Verbindung beider Größen durch eine Kapazität

$$C' = \frac{C}{1 - L \cdot C \cdot \omega^2} \dots 11)$$

oder durch eine Selbstinduktion

$$L' = L - \frac{1}{C \cdot \omega^2}.$$

Wir behandeln nunmehr beispielsweise den Fall, daß sich ein Wechselstromkreis an den Punkten M und N in zwei parallele Zweige spaltet, die beide Widerstand, Selbstinduktion und Kapazität enthalten, und nehmen an (vergl. Fig. 44), die treibende EMK zwischen den Verzweigungspunkten M und N sei bekannt und sei E.

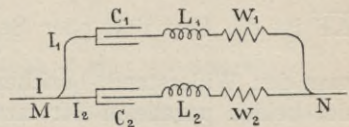


Fig. 44. Zwei parallel geschaltete Zweige mit Kapazität, Selbstinduktion und Widerstand.

Wir wählen zunächst die Gerade OA (vgl. Fig. 45) im Maßstabe der Volt gleich E und konstruieren über OA als Durchmesser den Kreis.

Hierauf bilden wir die Differenzen $\frac{1}{C_1 \omega} - L_1 \omega$ und $\frac{1}{C_2 \omega} - L_2 \omega$

und berechnen oder konstruieren die zugehörigen Voreilungs- oder Verzögerungswinkel

$$\operatorname{tg} \theta_1 = \frac{1}{C_1 \omega} - L_1 \omega \quad \text{und} \quad \operatorname{tg} \theta_2 = \frac{1}{C_2 \omega} - L_2 \omega \quad . . . 12)$$

Dadurch sind alsdann die Dreiecke ABO und ACO bestimmt, und zwar ist: $\overline{OB} = W_1 J_1$ die wirksame EMK im ersten und $\overline{OC} = W_2 J_2$ die wirksame EMK im zweiten Zweige. Durch Division

dieser Größen mit den zugehörigen induktionslosen Widerständen W_1 bzw. W_2 findet man die Stromstärken J_1 und J_2 .

Diese beiden Stromstärken setzt man alsdann nach dem Parallelogramm der Vektoren zusammen und findet sowohl die Stromstärke $J = \overline{OD}$, die im unverzweigten Teile des Stromkreises fließt, als den Voreilungs- oder Verzögerungswinkel θ des Stromes $J = \overline{OD}$ gegen die treibende EMK E der Wechselstromquelle, die durch \overline{OA} dargestellt war. Die Gerade \overline{OD} schneidet die Kreisperipherie in F, demnach ist $\overline{OF} = WJ$; W ist der induktionsfreie Widerstand und \overline{AF} ist die Kapazität oder Selbstinduktion $\frac{1}{C \cdot \omega} - L \cdot \omega$, durch die

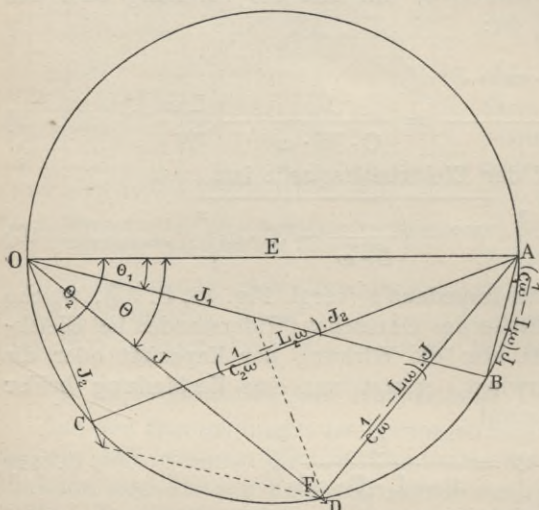


Fig. 45. Vektordiagramm für zwei parallel geschaltete Zweige mit Kapazität, Selbstinduktion und Widerstand.

man den Widerstand, beziehentlich die Selbstinduktion und Kapazität der beiden parallelen Stromzweige ersetzen könnte.

Wären mehr als zwei parallele Zweige vorhanden, so würde man zunächst die ersten beiden Zweige auf die soeben erläuterte Weise zu je einem sie ersetzenden W und $\frac{1}{C \cdot \omega} - L \cdot \omega$ zusammensetzen,

diese würde man mit dem dritten vereinigen und so fortfahren, bis alle Zweige berücksichtigt worden wären.

Das Verfahren erinnert also in seinem Grundgedanken an die Zusammensetzung mehrerer an einem Punkte angreifender Kräfte, die zu einer Resultante vereinigt werden sollen. In diesem Falle kann man auch zuerst zwei Kräfte zu einer Resultante vereinigen, diese Resultante dann mit einer dritten Kraft zu einer neuen Resultante zusammensetzen und so fortfahren, bis alle Kräfte berücksichtigt sind.

Durch Vereinigung der für Hintereinanderschaltung und für Parallelschaltung angegebenen Verfahren kann man nunmehr jede beliebige Aufgabe über gemischte Schaltungen von Selbstinduktionen, Kapazitäten und Widerständen in Wechselstromkreisen lösen.

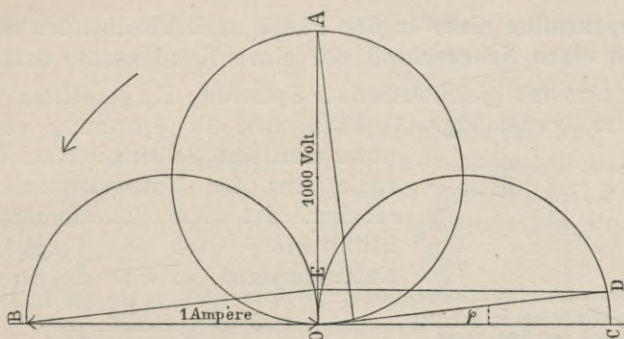


Fig. 46. Einem Zweige mit Kapazität ist ein zweiter Zweig parallel geschaltet, der Widerstand und Selbstinduktion enthält.

Zahlenbeispiel. Wir entnehmen ein lehrreiches Beispiel dem bekannten Werke von Bedell und Crehore, »Alternating Currents«, S. 336.

Der eine Zweig enthalte nur einen Kondensator, dessen Kapazität $C_1 = 1$ Mikrofarad ist, der andere parallele Zweig einen Widerstand von der Größe $W_2 = 100$ Ohm und eine Spule mit Selbstinduktion, deren Selbstinduktionskoeffizient $L_2 = 1$ Henry ist. Die Größe ω sei gleich 1000. In Fig. 46 ist somit $L_1 = 0$, $W_1 = \infty$ und $C_2 = \infty$.

Der Kondensatorstromkreis enthalte keinen Widerstand, die Kapazität sei also durch kurze Kabelstücke an die Verzweigungsstellen angeschlossen. Der Kondensatorstrom \overline{OB} ist daher der treibenden EMK der Stromquelle um 90° voraus, die letztere \overline{OA} betrage 1000 Volt.

Dann ist der Strom

$$\overline{OB} = C_1 \cdot E \cdot \omega = 10^{-6} \times 1000 \times 1000 = 1 \text{ Ampère.}$$

Die Tangente des Phasenverschiebungswinkels θ_1 , um den der den Widerstand und die Spule mit Selbstinduktion durchfließende Strom \overline{OD} hinter der EMK \overline{OA} zurückbleibt, ist:

$$\text{tang } \theta_1 = \frac{L_2 \cdot \omega}{W_2} = \frac{1 \times 1000}{100} = 10$$

Der Strom \overline{OD} bleibt daher beinahe um 90° hinter der EMK zurück und ist nahezu gleich \overline{OC} ; \overline{OC} aber ist:

$$\overline{OC} = \frac{E}{L_2 \omega} = \frac{1000}{1 \times 1000} = 1 \text{ Ampère.}$$

Wir erhalten dann für die Resultante der beiden einzelnen Ströme, die nahezu einen Winkel von 180° miteinander einschließen, den Wert OE , und $OE = 0,1$ Ampère.

Der resultierende Strom beträgt also nur ungefähr den zehnten Teil jeder der beiden Komponenten.

Wir sehen also, daß man, wenn infolge hoher Selbstinduktion die Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung sehr hoch ausfällt und die zur Hervorbringung einer bestimmten Arbeitsleistung erforderliche Stromstärke zu groß wird, durch Parallelschalten eines Kondensators von geeigneter Kapazität die Phasenverschiebung und die Stromstärke verkleinern kann. Wären Kondensatoren von großer Kapazität nicht sehr kostspielig und wenig haltbar, so würde man in der Praxis gewiß öfters von diesem Hilfsmittel Gebrauch machen.

4. Kompensation eines in der Phase zurückbleibenden Stromes durch einen Nebenschluß, der einen Kondensator enthält.

In einem mit gleichbleibender Spannung E_0 gespeisten Wechselstromkreise (vergl. Fig. 47) kann man die Spannung verändern, wenn man eine Selbstinduktion (Drosselspule) vor den Nutzwiderstand w einschaltet. Ist diese Selbstinduktion verhältnismäßig groß im Vergleich zum Nutzwiderstand, so wird die Stromstärke

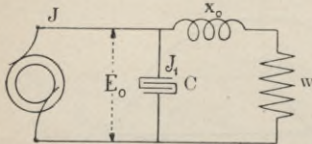


Fig. 47. Ein Kondensator, parallel zu Widerstand und Induktanz.

$$J = \frac{E_0}{\sqrt{w^2 + \omega^2 L^2}}$$

nahezu unveränderlich, näherungsweise gleich $\frac{E_0}{\omega L}$.

Der Strom bleibt aber dann weit hinter der Spannung hinsichtlich der Phase zurück und die Stromstärke ist viel größer als der im Nutzwiderstand geleisteten Arbeit entspricht.

Legt man jedoch vor Nutzwiderstand und Induktanz einen Nebenschluß, der einen Kondensator enthält, so kann man dadurch die Phasendifferenz zwischen Strom und Spannung verringern und die Stromstärke der Arbeitsleistung nahezu proportional machen.

Abgesehen von den geringen Verlusten durch Widerstand, magnetische und dielektrische Hysteresis, die sich durch Erwärmung der Drosselspule und des Kondensators merklich machen, entsteht durch die Zuffügung der Selbstinduktion und des Kondensators kein Energieverlust.

Die Stromstärke J_1 im Kondensatorstromkreise ist:

$$J_1 = \frac{E_0}{C \omega}$$

Die Gesamtstromstärke J_0 im ungeteilten Stromkreis setzt sich als Resultante aus J und J_1 zusammen und ist:

$$J_0 = E_0 \cdot \sqrt{\left(\frac{w}{w^2 + \omega^2 L^2}\right)^2 + \left(\frac{\omega L}{w^2 + \omega^2 L^2} - \frac{1}{\omega C}\right)^2} \quad \dots \quad 13)$$

Die Spannung E an den Enden des Widerstandes w ist:

$$E = J \cdot w = E_0 \cdot \frac{w}{\sqrt{w^2 + \omega^2 L^2}} \dots \dots \dots 14)$$

Die Gesamtstromstärke J_0 ist mit E_0 in gleicher Phase, die Phasenverschiebung $\varphi = 0$, wenn $\frac{\omega L}{1} = \frac{1}{\omega C}$

$$\tan \varphi = \frac{w^2 + \omega^2 L^2}{w} - \frac{1}{\omega C} = 0 \dots \dots \dots 15)$$

$$\frac{1}{\omega C} = \frac{w^2 + \omega^2 L^2}{w}$$

ist. Dies ist der Fall, wenn:

$$\frac{\omega L}{w^2 + \omega^2 L^2} - \frac{1}{\omega C} = 0$$

oder

$$\omega C = \frac{w^2 + \omega^2 L^2}{\omega L} \dots \dots \dots 16)$$

ist.

Wenn die Selbstinduktion ωL unveränderlich und die Kompensation für einen bestimmten Wert von w hergestellt ist, so wird mit wachsendem w der Zähler von $\tan \varphi$ negativ, d. h. dann eilt der Strom der Spannung vor. Das entgegengesetzte findet statt, wenn w abnimmt.

5. Verwendung einer Kapazität im Nebenschlusse zu zwei gleichen Selbstinduktionen.

In einem mit konstanter EMK betriebenen Stromkreise, der eine beträchtliche konstante Selbstinduktion $x_1 = \omega L_1$ und einen veränderlichen Widerstand W enthält, ist die Stromstärke wenig veränderlich und nimmt nur allmählich bei wachsendem W ab. Der Strom bleibt aber erheblich in der Phase hinter der EMK zurück.

Legt man nun in einen Nebenschluß zu W eine Kapazität C , so kann man dadurch den Strom mit der Spannung in Phase bringen. Wenn diese Kapazität aber für $W = 0$ Strom und Spannung in gleiche Phase bringt, so wird dann bei wachsendem W der Strom der Spannung vorauslaufen, weil der Strom in W mit zunehmendem W mehr und mehr abnimmt.

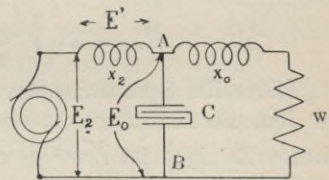


Fig. 48. Selbstregelung auf unveränderliche Spannung.

Durch Einfügung einer Induktanz $x_0 = L_2 \omega$ vor den Nebenschluß, der die Kapazität enthält, könnte man die Spannung E_0 zwischen den Verzweigungspunkten A und B erhöhen. (Vergl. Fig. 48.)

Die Stromstärke in W wäre, wenn $\frac{1}{\omega C} = L_2 \cdot \omega = x_0$ ist:

$$J = \frac{E_0}{\sqrt{W^2 + x_0^2}}$$

und die Stromstärke, die scheinbar durch den Kondensator fließt,

$$J_c = \frac{E_0}{\omega C} = \frac{E_0}{x_0}.$$

In der ungeteilten, gemeinsamen Zuführungsleitung herrsche die Stromstärke J_0 . Da aber J_c und J_0 nicht in gleicher Phase, sondern um 90° in der Phase verschieden sind, erhält man:

$$J_0 = \sqrt{J^2 - J_c^2} = E_0 \sqrt{\frac{1}{W^2 + x_0^2} - \frac{1}{x_0^2}} = E_0 \cdot W \cdot \sqrt{\frac{1}{x_0^2 (W^2 + x_0^2)}} \quad 16)$$

Die EMK E an den Enden des Widerstandes W ist:

$$E = J \cdot W = \frac{E_0 \cdot W}{\sqrt{W^2 + x_0^2}}.$$

Die in dem induktiven Widerstande mit der Selbstinduktion L_2 verbrauchte EMK E' ist $J_0 \cdot x_2$, wenn man mit $x_2 = \omega \cdot L_2$ die Induktanz dieses Widerstandes bezeichnet.

Demnach ist, wenn man für J_0 seinen Wert einsetzt:

$$E' = \frac{E_0 \cdot W \cdot x_2}{\sqrt{x_0^2 (W^2 + x_0^2)}} \quad \dots \quad 17)$$

Die EMK der Wechselstrommaschine E_2 ist mit E' in Phase, mit E_0 um 90° in der Phase verschieden, daher:

$$\begin{aligned} E_2 &= \sqrt{E_0^2 - E'^2} = \sqrt{E_0^2 - \frac{E_0^2 \cdot w^2 \cdot x_2^2}{x_0^2 (w^2 + x_0^2)}} = \\ &= E_0 \sqrt{\frac{w^2 \cdot (x_0^2 - x_2^2) + x_0^4}{x_0^2 (w^2 + x_0^2)}} \quad \dots \quad 18) \end{aligned}$$

Daraus folgt E_0 die Spannung an den Klemmen des Kondensators:

$$E_0 = E_2 \sqrt{\frac{x_0^2 (w^2 + x_0^2)}{w^2 \cdot (x_0^2 - x_2^2) + x_0^4}} \quad \dots \quad 19)$$

Dieselbe Spannung herrscht auch an den Enden des Zweiges, in dem die Induktanz x_0 und der Widerstand w liegt. Die Impedanz dieses Zweiges ist $\sqrt{w^2 + x_0^2}$. Die Stromstärke J in diesem Zweige wird somit:

$$J = \frac{E_0}{\sqrt{w^2 + x_0^2}} = \frac{E_2 \cdot x_0}{\sqrt{w^2 \cdot (x_0^2 - x_2^2) + x_0^4}} \quad \dots \quad 20)$$

Macht man nun $x_2 = x_0$, so verschwindet das Glied unter dem Wurzelzeichen, welches den Widerstand w enthält, und es wird

$$J = \frac{E_2}{x_0} \quad \dots \quad 21)$$

Bleibt somit die EMK E_2 der Wechselstrommaschine unveränderlich, so bleibt auch die Stromstärke im Nutzwiderstand J dieselbe, wie groß auch die mit w sich ändernde Belastung sein mag.

Die Stromstärke J_0 in der Zuleitung vor den Verzweigungspunkten A und B ist:

$$J_0 = \frac{E_2 \cdot w}{x_0^2}; \dots \dots \dots 22)$$

J_0 ist dem Widerstande w proportional.

Für eine Einrichtung mit hintereinandergeschalteten Glühlampen, die alle mit gleichbleibender Stromstärke betrieben werden sollen, ist eine solche selbsttätige Regelung der Stromstärke von außerordentlichem Werte.

Die im vorstehenden gekennzeichnete Anordnung ist außerdem auch umkehrbar.

Halten wir nämlich die Stromstärke J_0 im ungeteilten Leiter konstant, so ist die Stromstärke J in dem Teile der verzweigten Leitung, die den Widerstand w enthält:

$$J = J_0 \cdot \frac{x_0}{w} \dots \dots \dots 23)$$

somit der Belastung $\frac{1}{w}$ proportional und die Spannung an diesem Zweige

$$E = J_0 \cdot x_0 \dots \dots \dots 24)$$

also ebenfalls konstant.

Die EMK an den Klemmen der Wechselstrommaschine E_2 ist:

$$E_2 = \frac{x_0^2}{w} \cdot J_0 \dots \dots \dots 25)$$

somit der Belastung $\frac{1}{w}$ proportional.

Wir können somit, wenn wir die Stromstärke der Maschine unveränderlich erhalten, ein System parallel geschalteter Glühlampen mit unveränderlicher Spannung betreiben, gleichviel ob viele oder wenige Lampen eingeschaltet sind.

Man erkennt, daß, wenn man in einem aus nichtinduktivem Widerstand bestehenden Leiter w zwei gleiche Selbstinduktionen x_0 hintereinander schaltet und einen Nebenschluß, in dem sich eine Kapazität C befindet, einerseits zwischen diese beiden Selbstinduktionen und das andere Ende des nicht induktiven Widerstandes w legt,

sodaß $\frac{1}{\omega C} = \omega \cdot L = x_0$ ist, so bewirkt diese Anordnung, daß man

beliebig von gleichbleibender Spannung auf unveränderliche Stromstärke und von konstanter Stromstärke auf gleichbleibende Spannung transformieren kann, ohne daß dadurch eine Phasendifferenz zwischen Strom und Spannung veranlaßt wird. Für die Praxis wäre diese Möglichkeit gelegentlich nicht ohne Bedeutung, wenn es dauerhafte Kondensatoren mit erheblicher Kapazität für hohe Wechselspannungen gäbe.

6. Der wattlose Strom.

Wir haben in den vorhergehenden Abschnitten gesehen, daß wattlose Ströme überall da auftreten, wo magnetische Felder in abwechselnd entgegengesetzter Richtung durch Wechselströme erzeugt oder wo Kondensatoren durch Wechselstrom in abwechselnd entgegengesetzter Richtung geladen werden.

Ein Strommesser, welcher in eine wattlosen Strom führende Leitung eingeschaltet wird, zeigt diesen Strom an; eine Erwärmung oder sonstige Arbeitsleistung aber bringt dieser Strom nicht hervor, ebensowenig ist zu seiner Hervorbringung ein Arbeitsaufwand nötig, weil er gegen seine ihn veranlassende Wechselspannung um 90° in der Phase verschoben ist. (Vergl. Kap. 9, S. 19.)

Merklich wird der wattlose Strom jedoch durch seine Rückwirkung auf die Wechselstromerzeuger.

Ist der Anker einer Wechselstrommaschine stromlos, so wird das Ankereisen nur von den Kraftlinien durchsetzt, die von den Feldmagneten herrühren. In den Ankerwindungen wird nur EMK, kein Strom erzeugt. Ein wattloser Strom ist ebenfalls nicht vorhanden.

Liefert der Anker Nutzstrom, so entsteht infolge der Ampèrewindungen des Ankers ein zweites Kraftliniensystem, welches senkrecht zu dem von den Feldmagneten erzeugten steht, solange die Belastung völlig induktionsfrei ist (z. B. nur Glühlampen, keine Elektromagneten, keine konzentrischen Kabel oder sonstige Kondensatoren enthält). Durch Zusammensetzung der beiden rechtwinkligen Magnetfelder entsteht ein resultierendes Feld. Will man die EMK der Wechselstrommaschine konstant erhalten, so muß man den Erregerstrom vergrößern, um diese Feldverschiebung wieder auszugleichen.

Ist aber die Belastung rein wattlos oder ist ihr Strom um 90° hinter der EMK in der Phase zurück, so ist das von diesem Strom erzeugte Kraftliniensystem dem von dem Feldmagneten erzeugten gerade entgegengesetzt gerichtet, es subtrahiert sich also von demselben. Will man also nunmehr die Spannung aufrecht erhalten, so müssen die Feldmagneten viel stärker erregt werden als vorher.

Die Einschaltung von Apparaten mit hoher Selbstinduktion bewirkt daher einen viel stärkeren Spannungsabfall der Wechselstrommaschine als gleiche Belastung durch induktionsfreie Apparate.

Besteht die Belastung aber aus einem wattlosen Strom eines Kondensators oder einer ähnlich wirkenden Vorrichtung (z. B. einem übererregten Synchronmotor), so eilt dieser Strom der Spannung um 90° voran. Die Wirkung der Ampèrewindungen dieses Stromes addieren sich zu den Kraftlinien, die der Feldmagnet erzeugt; die

Spannung der Wechselstrommaschine wird daher mit zunehmender Belastung wachsen.

Es zeigt dies den Weg, den man zu betreten hat, um die wattlosen Ströme und die dadurch veranlaßten Phasendifferenzen zwischen EMK und Nutzstrom zu kompensieren.

Den hinter der EMK nachhinkenden Strom bringt man in Phase durch Anwendung von Apparaten, die wie eine Kapazität wirken. Hat man dagegen Wechselstromkreise mit voreilemendem Strome, so kann man durch Gebrauch von Apparaten mit Selbstinduktion (Drosselspulen, Asynchronmotoren) die Phasengleichheit herstellen.

Solche nahezu oder vollkommen kompensierte Wechselstromsysteme bergen aber insofern eine gewisse Gefahr in sich, als sie dazu neigen unter ungünstigen Umständen (geringer Widerstand), bei jäher Unterbrechung starker Ströme (Verschwinden eines Kurzschlusses, Durchbrennen einer Sicherung) zu elektrischen Schwingungen Anlaß zu geben, die infolge der auftretenden Resonanzerscheinungen (vergl. Kap. 4, 2., S. 57) zu momentan auftretendem, ungewöhnlichem Anwachsen der Spannung führen, sodaß die Isolationen der Kabel oder der Maschinen durchschlagen werden können.

7. Kapazität, Ohmscher und induktiver Widerstand, die längs einer Wechselstromleitung verteilt sind. Ferrantisches Phänomen.

Bei wirklichen Wechselstromnetzen muß darauf Rücksicht genommen werden, daß die Kapazität der zur Leitung des Stromes dienenden Kabel längs dieser Leitungen stetig verteilt ist. Zumal bei Verwendung von konzentrischen Kabeln von beträchtlicher Länge, wie solche in neuerer Zeit vielfach verwendet werden, um die an einem Punkte in Form einer Wasserkraft verfügbare Energiemenge an einen weit entfernten Punkt durch Wechselströme von hoher Spannung zu übertragen, kommt dieser Umstand in Betracht und kann unter gewissen Verhältnissen praktische Bedeutung gewinnen.

In einem solchen Falle wechselt streng genommen Spannung und Stromstärke von Punkt zu Punkt der Leitung. Die Änderung wird aber nicht einmal streng gleichmäßig erfolgen, weil Kabelabzweigungen und in entgegengesetztem Sinne wirkende Selbstinduktionen, oder bei Luftleitungen die als Kondensatoren zwischen Leitung und Erde wirkenden Isolatoren Unregelmäßigkeiten bedingen. Eine streng rechnerische oder genaue graphische Behandlung einer solchen Aufgabe ist unmöglich; wir können uns jedoch ein annäherndes Bild von den Verhältnissen durch folgende Betrachtung verschaffen.

Ist die Wirkung der Kapazität der Wechselstromleitung gering, so kann man diese Wirkung durch einen Kondensator von gleicher

Kapazität ersetzt denken, der einen Nebenschluß zwischen den beiden stromführenden und nunmehr kapazitätsfrei gedachten Leitern bildet.

Eine für die meisten in der Praxis vorkommenden Fälle ausreichende Annäherung an die Wirklichkeit erhält man,¹⁾ wenn man sich an den beiden Enden der Leitung zwei Kondensatoren von je $\frac{1}{6}$ der Kapazität der Leitung und in der Mitte der Leitung eine Kapazität von $\frac{2}{3}$ Größe parallel geschaltet denkt.

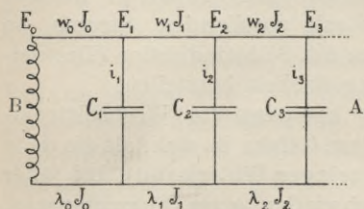


Fig. 49. Kapazität und Selbstinduktion, längs einer Leitung verteilt.

Wir wollen annehmen, wir hätten die mehr oder minder gleichmäßig verteilte Kapazität der Fernleitung durch drei Kapazitäten ersetzt, die passend zwischen Stromerzeuger und Verbrauchsstelle eingeschaltet sind.

Die Größe und Phase der an der Verbrauchsstelle B auftretenden Stromstärke J_0 und E_0 wollen wir als bekannt voraussetzen.

Wir bezeichnen mit w_0, w_1, w_2, w_3 die Leitungswiderstände der Strecken der Hin- und Rückleitung, die durch die zwischengeschalteten Kondensatoren entstanden sind, mit L_0, L_1, L_2, L_3 die Größen der auf diesen Strecken liegenden Selbstinduktionen und mit C_1, C_2, C_3 die Kapazitäten der zwischenliegenden Kondensatoren. (Vergl. Fig. 49.) Wir setzen ferner abkürzungsweise $2\pi \sim L = \lambda$.

Bei einer solchen schematischen Anordnung ändert sich Stromstärke, Spannung und Phasendifferenz sprungweise, während in einem wirklichen Wechselstromnetze die Änderung durch den Einfluß der verteilten Kapazität sich stetig ändert.

In den Vektorendiagrammen der Spannungen und der Stromstärken (Fig. 50) ist E_0 und J_0 nach Größe und Richtung gegeben.

An den E_0 darstellenden Vektor tragen wir $w_0 \cdot J_0$ seiner Größe nach parallel J_0 an und senkrecht dazu die Induktanz $\omega L J_0 = \lambda_0 \cdot J_0$;

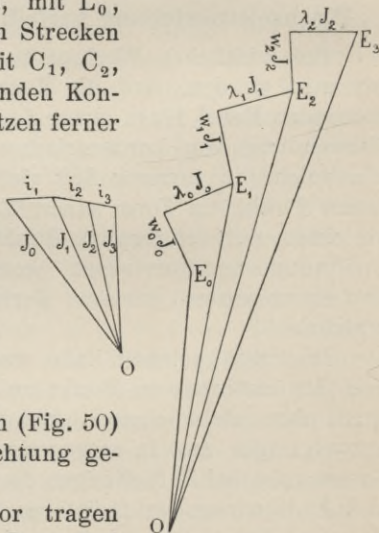


Fig. 50. Verteilte Kapazität längs einer Leitung.

¹⁾ Nach Steinmetz, Theory and Calculation of Alternating Current Phenomena S. 131.

dann ist (nach Kap. 2, 4., S. 33) E_1 nach Größe und Phase die an den Klemmen des ersten Kondensators auftretende Spannung.

Aus E_1 berechnen wir die Kondensatorstromstärke:

$$i_1 = \omega \cdot C_1 \cdot E_1,$$

die bekanntlich gegen E_1 eine Phasenvoreilung von 90° aufweist. Wir tragen also i_1 senkrecht zu E_1 an J_0 an und finden dadurch nach Größe und Phase J_1 , die Stromstärke im nächsten Abschnitte.

Um die Verhältnisse in diesem Abschnitte zu erhalten, tragen wir an das Ende von E_1 den Spannungsverlust $J_1 \cdot w_1$, der in Phase mit J_1 ist, parallel zu J_1 an. Die Strecke $\lambda_1 J_1$ tragen wir senkrecht dazu auf und finden auf diese Weise E_2 . Nunmehr bestimmt man damit die Stromstärke im zweiten Kondensator

$$i_2 = \omega \cdot C_2 \cdot J_2$$

und trägt diese senkrecht zu E_2 an J_1 an. Dadurch wird J_2 gefunden.

In gleicher Weise findet man E_3 und J_3 , und weiter E_4 und J_4 u. s. f., die letzte wollen wir als mit Spannung und Stromstärke des Stromerzeugers identisch betrachten.

In dem vorliegenden Beispiele nehmen die Stromstärken vom Stromerzeuger an bis zur Verbrauchsstelle ab, die Spannungen hingegen nehmen zu.

Es kann unter gewissen Umständen aber auch das Gegenteil eintreten, es kann die Stromstärke wachsen und die Spannung vom Stromerzeuger bis zur Stromentnahmestelle abnehmen, wenn nämlich J_0 sehr klein oder gar Null wird, d. h. wenn fast kein Stromverbrauch an der Stromentnahmestelle stattfindet. Ist z. B. $J_0 = 0$, so ist $w_0 \cdot J_0 = 0$ und $\lambda_0 \cdot J_0 = 0$. Es fällt also E_1 mit E_0 zusammen und J_1 steht senkrecht auf E_0 .

Bildet man nun die Diagramme in derselben Weise, wie dies vorhin geschehen ist, weiter, so erkennt man, daß E_3 kleiner als E_0 und J_3 größer als J_1 ist. (Vergl. Fig. 51.)

Als seiner Zeit Ferranti die mehrere Kilometer langen konzentrischen Kabel seiner Deptforder Zentrale in London mehr und mehr entlastete, stieg die Spannung am Ende der Leitung weit über die in der Zentrale erzeugte Spannung, und die zuletzt noch eingeschalteten Glühlampen brannten infolge Überanstrengung durch zu hohe Spannung einfach durch. Man nennt diese Spannungssteigerung an den Enden schwach belasteter, langer, konzentrischer Kabel daher das Ferrantische Phänomen.

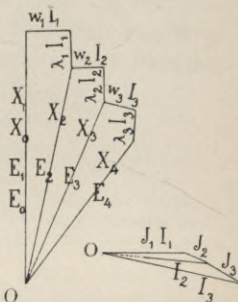


Fig. 51. Längs einer Leitung verteilte Kapazität und Selbstinduktion.

Bei einer rechnerischen Behandlung eines solchen Falles muß noch auf die unvermeidlichen Stromverluste durch mangelhafte Isolation Rücksicht genommen werden. Man kann diese Verluste dadurch in Betracht ziehen, daß man an den Anschlußstellen der Kondensatoren passende induktionsfreie Widerstände zwischen die Hin- und Rückleitung eingeschaltet annimmt und auf die diese Widerstände durchfließenden Ströme, die mit der Spannung in Phase sind, bei Aufstellung der Diagramme Rücksicht nimmt.

Wir wollen diese weitere Verwicklung hier jedoch außer Betracht lassen.



5. Kapitel.

Die Darstellung von periodisch veränderlichen Werten durch komplexe Grössen.

1. Die Zerlegung veränderlicher Grössen in rechtwinkelige Komponenten.

Wir haben in Kap. 1, 5., S. 8 u. s. f. gesehen, daß man zwei gleichartige, nach Sinusfunktionen von gleicher Periodenzahl veränderliche Größen durch Vektoren darstellen und diese Vektoren wie Wege, Geschwindigkeiten, Beschleunigungen, Kräfte nach einem Parallelogramm geometrisch zu einer Resultante zusammensetzen kann. Ebenso kann man jederzeit Wechselstromstärken oder Wechselspannungen in zwei aufeinander rechtwinkelige Komponenten zerlegen.

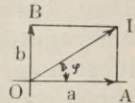


Fig. 52. Zerlegung einer Stromstärke in zwei Komponenten.

Statt also beispielsweise die Stromstärke i zur Zeit t durch die Größe des Vektors J und den Phasenwinkel φ darzustellen (vergl. Fig. 52), kann man $J = i = \sqrt{2} i_{\text{eff}} \sin \omega t$, die um den Phasenunterschied φ gegen die Spannung verschobene Stromstärke auch in die beiden Komponenten OA und OB zerlegen. Alsdann ist:

$$OA = a = J \cdot \cos \varphi \text{ und } OB = b = J \cdot \sin \varphi, \text{ ferner } J = \sqrt{a^2 + b^2}.$$

Auch die Zusammensetzung zweier Vektoren zu einem resultierenden, wie wir dies in Fig. 4, S. 8 gesehen haben, vollzieht sich auf die einfachste Weise.

Sollen z. B. die beiden in Phase verschiedenen Wechselstromstärken J_1 und J_2 zur resultierenden Gesamtstromstärke J zusammengesetzt werden, so kann man dies anstatt auf dem in Fig. 4 angegebenen Wege auch dadurch bewirken, daß man J_1 und J_2 in ihre beiden rechtwinkligen Komponenten zerlegt (Fig. 53), die so erhaltenen Komponenten in jeder der beiden Richtungen addiert, also (vergl. Fig. 53) die Summen bildet:

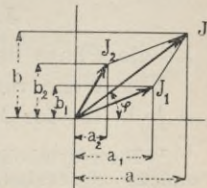


Fig. 53. Geometrische Summation zweier Stromstärken.

$$a = a_1 + a_2 \text{ und } b = b_1 + b_2$$

und aus diesen Summen a und b die Resultante J zusammensetzt.

Es ist dann: $J = \sqrt{a^2 + b^2}$ und $\tan \varphi = \frac{b}{a}$.

φ ist der Phasenwinkel des resultierenden Gesamtstromes.

Man erkennt, daß man periodisch veränderliche Größen zu Resultierenden zusammensetzen kann, indem man ihre im gleichen Sinne gebildeten, rechtwinkligen Komponenten algebraisch addiert.

2. Die Einführung der imaginären Einheit $j = \sqrt{-1}$.

Besonders naheliegend ist diese Zerlegung in zwei rechtwinklige Komponenten für Stromstärken, die gegen die erzeugende EMK in der Phase verschoben sind. Man wählt alsdann die eine Komponente in der Richtung der EMK und die andere senkrecht dazu. Alsdann ist die in der Richtung der EMK gelegene Komponente der watterzeugende Strom, die hierzu senkrechte Komponente der wattlose Strom (vergl. Kap. 2, 1., S. 28).

Da der wattlose Strom, der zur EMK in Quadratur steht, gegen dieselbe eine Phasenverschiebung von 90° besitzt, so kann man im Anschluß an die in der Theorie der komplexen Zahlen übliche Darstellung diesen wattlosen Strom als einen imaginären Strom, die watterzeugende Komponente als einen reellen Strom ansehen. Die wattlose Komponente unterscheidet man dann dadurch von der watterzeugenden, daß man die absolute Größe der wattlosen Komponente mit $j = \sqrt{-1}$ multipliziert.¹⁾

Dann kann man, wie bei der Darstellung komplexer Zahlen, schreiben: $J = a + j \cdot b \dots \dots \dots 1)$

Es bedeutet dies: J besteht aus zwei rechtwinkligen Komponenten, von welchen die eine a den wattführenden Strom und $j \cdot b$ den wattlosen Strom bedeutet.

Es ist nunmehr der absolute Wert von J:

$$J = \sqrt{a^2 + b^2} \text{ und } \tan \varphi = \frac{b}{a} \dots \dots \dots 2)$$

φ ist die Phase des Stromes J.

Eine Welle von gleicher Stärke, die aber um 180° von der Welle $a + j \cdot b$ in der Phase verschieden ist, wird in der ursprünglichen

¹⁾ Diese symbolische Schreibweise periodisch veränderlicher Größen durch komplexe algebraische Ausdrücke haben von Helmholtz (Ber. d. Berliner Akad. 1878, S. 488) und Lord Rayleigh (Phil. Mag. 1886) in die Elektrizitätslehre eingeführt. Auf elektrotechnische Probleme hat sie 1891 zuerst A. Franke und weiterhin 1893 Proteus Steinmetz angewendet. Letzterer hat diese Darstellungsweise meisterhaft zu einem wichtigen Hilfsmittel der theoretischen Wechselstromtechnik entwickelt.

Bei rein mathematischen Darstellungen wird die imaginäre Einheit $\sqrt{-1}$ meist durch den Buchstaben i bezeichnet; da dieser Buchstabe in der Elektrotechnik aber bereits für Stromstärken verwendet wird, soll hier $\sqrt{-1}$ durch j ausgedrückt werden. Man beachte, daß hier die Drehrichtung der in der Algebra üblichen entgegengesetzt ist.

Vektorendarstellung durch einen gerade entgegengesetzt gerichteten Vektor dargestellt. In unserer symbolischen Darstellung wäre diese Welle durch $-J = -a - j \cdot b$ auszudrücken.

Durch die Multiplikation einer Welle $a + j \cdot b$ mit -1 wird also diese Welle in eine gerade entgegengesetzte verkehrt, oder um eine halbe Periode (um π oder 180°) in der Periode verschoben.

Eine Welle, die um 90° hinter der anderen zurück ist, hat die horizontale Komponente $-b$ und die vertikale Komponente a , würde also durch $-b + j \cdot a$ dargestellt.

$-b + j \cdot a$ geht aber aus $a + j \cdot b$ durch Multiplikation mit der imaginären Einheit hervor, denn es ist:

$$j \cdot (a + j \cdot b) = j a + j^2 b = -b + j a,$$

da $(\sqrt{-1})^2 = -1$ ist.

Wenn man demnach eine Sinuswelle mit der imaginären Einheit multipliziert, so wird sie dadurch um 90° in der Drehrichtung oder um 90° in der Phase gegen die EMK vorgeschoben, sie eilt nunmehr um eine Viertelperiode der Welle $a + j \cdot b$ voraus.

Entsprechend wird durch Multiplikation einer Sinuswelle mit $-j$ dieselbe um 90° zurückgeschoben. Die Welle $-j \cdot (a + j \cdot b) = b - j a$ hinkt demnach um eine Viertelperiode hinter $a + j \cdot b$ nach.

Da wir vorher im Abschnitt 1 dieses Kapitels sahen, daß man durch algebraische Addition der gleichartigen Komponenten aus diesen Summen ohne weiteres die Resultante zweier Wellen bilden kann, so folgt, daß der durch die Zusammensetzung zweier Wellen $a_1 + j \cdot b_1$ und $a_2 + j \cdot b_2$ entstehende Wellenzug durch das Ergebnis der einfachen Addition $a_1 + a_2 + j \cdot (b_1 + b_2)$ ausgedrückt wird.¹⁾ (Fig. 53.)

¹⁾ Wir erinnern ganz kurz an die bekannten Formeln aus der Algebra der komplexen Größen, die in allen höheren Schulen in der Sekunda beziehentlich Unterprima gelehrt werden.

$$X = a_1 + b_1 \cdot j; \quad Y = a_2 + b_2 \cdot j; \quad Z = a + b \cdot j.$$

$$1. \text{ Addition: } Z = X \pm Y, \quad Z = a_1 \pm a_2 + j \cdot (b_1 \pm b_2) = (a_1 \pm a_2) + j \cdot (b_1 \pm b_2), \\ a = a_1 \pm a_2, \quad b = b_1 \pm b_2.$$

$$2. \text{ Multiplikation: } X = a_1 + j \cdot b_1 = r_1 \cdot (\cos \varphi_1 + j \cdot \sin \varphi_1) = r_1 \cdot e^{j \cdot \varphi_1};$$

$$Y = a_2 + j \cdot b_2 = r_2 \cdot (\cos \varphi_2 + j \cdot \sin \varphi_2) = r_2 \cdot e^{j \cdot \varphi_2};$$

$$Z = X \cdot Y = a_1 \cdot a_2 - b_1 \cdot b_2 + j \cdot (a_1 \cdot b_2 + b_1 \cdot a_2) = \\ = r_1 \cdot r_2 \{ \cos(\varphi_1 + \varphi_2) + j \cdot \sin(\varphi_1 + \varphi_2) \} = r_1 \cdot r_2 \cdot e^{j \cdot (\varphi_1 + \varphi_2)}$$

$$3. \text{ Division: } Z = X : Y = \frac{a_1 \cdot a_2 + b_1 \cdot b_2 + j \cdot (b_1 \cdot a_2 - a_1 \cdot b_2)}{a_2^2 + b_2^2} = \frac{r_1}{r_2} \cdot e^{j \cdot (\varphi_1 - \varphi_2)}$$

4. Potenzierung (Moivrescher Satz):

$$Z = X^n = (a + j \cdot b)^n = \{ r \cdot (\cos \varphi + j \cdot \sin \varphi) \}^n = r^n \cdot (\cos n \varphi + j \cdot \sin n \varphi) = r^n \cdot e^{j \cdot n \varphi}$$

5. Radizierung:

$$Z = \sqrt[n]{X} = (a + j \cdot b)^{\frac{1}{n}} = \sqrt[n]{r} \cdot \left(\cos \frac{\varphi}{n} + j \cdot \sin \frac{\varphi}{n} \right) = \sqrt[n]{r} \cdot e^{j \cdot \frac{\varphi}{n}}$$

3. Darstellung der Fälle von Widerstand und Selbstinduktion im Wechselstromkreis durch symbolische Ausdrücke.

Bedeutet nun $J = i - j \cdot i'$ die Sinuswelle eines um die Phasendifferenz φ gegen die Spannung verschobenen Wechselstromes und w einen induktionsfreien Widerstand, so ist die durch diesen Strom in diesem Widerstand verbrauchte Spannung oder die zur Überwindung dieses Widerstandes erforderliche EMK mit dem Strom in gleicher Phase.

Es ist diese EMK somit:

$$w J = w i - j \cdot w i'$$

Ist L die Induktanz oder Selbstinduktion und $x = \omega \cdot L$ die Reaktanz eines induktiven Widerstandes, so ist die gegen elektromotorische Kraft der Induktion $J \omega L$ um 90° hinter dem Strome zurück (vergl. Kap. 2), sie wird daher dargestellt durch

$$j \cdot J \omega L = j \cdot \omega L i + \omega L i' = j \cdot x \cdot i + x i'$$

Die zur Überwindung dieser EMGegenkraft erforderliche EMK muß von gleicher Größe aber entgegengesetzt gerichtet sein, sie ist hiernach:

$$- j J \omega L = - j x i - x i'$$

Diese EMK eilt also dem Strome um 90° voraus.

Enthält der Stromkreis einen nichtinduktiven Widerstand w und außerdem die Selbstinduktion L in Hintereinanderschaltung, so ist die zur Überwindung beider erforderliche EMK von dem Betrage $J \cdot (w - j \cdot x)$.

Hiernach ist:

$Z = w - j \cdot x$, wofür man übrigens auch schreiben kann:

$$Z = z \cdot (\cos \varphi' - j \cdot \sin \varphi') \dots \dots \dots 3)$$

Z ist die Impedanz des Stromkreises in komplexer Darstellung.

Die EMK E , die erforderlich ist in der Impedanz Z den Strom $J = i - j \cdot i'$ zu erzeugen, ist:

$$E = Z \cdot J = (w - j \cdot x) (i - j \cdot i') = z (\cos \varphi' - j \cdot \sin \varphi') \cdot i \cdot (\cos \varphi - j \cdot \sin \varphi) = i \cdot z \{ \cos (\varphi' + \varphi) - j (\sin \varphi' + \varphi) \}$$

oder wenn man ausmultipliziert und berücksichtigt, daß $j^2 = (\sqrt{-1})^2 = -1$ ist:

$$E = (w i + x \cdot i') + j \cdot (z \cdot i' - x \cdot i) = e - j \cdot e' = J w - J j x.$$

Die Bedeutung der Größen e und e' ergibt sich dadurch von selbst, e als die Komponente der EMK, die mit J in Phase ist, und $e' = J \cdot x$ mit 90° Voreilung gegen den Strom.

Ferner ist:

$$J = \frac{E}{Z} = \frac{e - j \cdot e'}{w - j \cdot x} = \frac{(e - j \cdot e') \cdot (w + j \cdot x)}{w^2 + x^2} = \frac{e \cdot w - e' \cdot x}{w^2 + x^2} + j \cdot \frac{e x + e' w}{w^2 + x^2} \dots \dots \dots 4)$$

In komplexen Ausdrücken gilt somit für Wechselstrom das Ohmsche Gesetz.

Die Größe: $z = \sqrt{w^2 + x^2}$ ist schon früher von uns als Impedanz bezeichnet worden. Die Impedanz wird bekanntlich in Ohm gemessen. Ihren reziproken Wert $y = \frac{1}{z} = \frac{1}{\sqrt{w^2 + x^2}}$ nennt man Admittanz; diese wird in reziproken Werten des Ohms gemessen und diese Einheit wird Mho genannt.

Der Ausdruck $\frac{w}{z^2} = \frac{w}{w^2 + x^2} = g$ heißt Konduktanz des Stromkreises, die ebenfalls in Mho gemessen wird.

$\frac{x}{z^2} = \frac{x}{w^2 + x^2} = b$ führt den Namen Suszeptanz des Stromkreises, auch sie wird in reziproken Werten des Ohms, in Mho gemessen.

Hiernach ist in Gl. 4:

$$J = E \cdot g + j \cdot E \cdot b.$$

Die Konstanten w , x und z eines Stromkreises benutzt man am einfachsten, wenn Widerstände und Reaktanzen in Hintereinanderschaltung auftreten.

Die Konstanten g , b , y werden angewendet, wenn man Widerstände und Reaktanzen in Parallelschaltung zu behandeln hat.

4. Kapazität im Stromkreise.

Wenn durch einen Kondensator ein Strom $J = i + j \cdot i'$ geht, so tritt an den Klemmen des Kondensators eine EMK

$$E = \frac{J}{\omega C}$$

auf, die um 90° in der Phase hinter dem Strome nachhinkt.

Man stellt E daher durch

$$E = - \frac{j \cdot J}{\omega C} = j \cdot J \cdot x_1$$

dar, wenn man mit x_1 $x_1 = \frac{1}{\omega C}$

die Reaktanz des Kondensators bezeichnet.

Da die Reaktanz herrührend von Kapazität das entgegengesetzte Vorzeichen hat, wie die von Induktionsvorgängen (Selbstinduktion oder gegenseitiger Induktion) herrührende, so kann man Reaktanzen beider Art jederzeit in ein Glied zusammenfassen.

Die Impedanz Z eines Wechselstromkreises, die einen Widerstand w , magnetische Reaktanz x und die Reaktanz x_1 einer Kapazität in Hintereinanderschaltung enthält, ist somit:

$$Z = w - j \cdot (x - x_1) \dots \dots \dots 5)$$

Für die Darstellung in komplexen Ausdrücken gilt das Ohmsche Gesetz in seinen drei Formen:

$$E = Z \cdot J, \quad J = \frac{E}{Z}, \quad Z = \frac{E}{J} \dots \dots \dots 6)$$

Ebenso gilt das erste und zweite Kirchhoffsche Gesetz über Stromverzweigungen.

1. Die Summe aller in einem geschlossenen Stromkreise tätigen EMK ist Null, wenn man Widerstände und Reaktanzen durch Multiplikation mit der Stromstärke als genelektromotorische Kräfte einführt.

2. Auch die Summe aller nach einem Verzweigungspunkt hin- oder von ihm abfließenden Ströme ist Null, wenn man die Stromstärke in komplexen Ausdrücken einführt.

Da nun aber die Forderung, daß eine komplexe Größe Null sein soll, nur dadurch befriedigt werden kann, daß sowohl der reellen als auch der imaginäre Teil Null sein muß, so schließt die Bedingung:

$$J_1 + J_2 + J_3 + \dots = 0$$

die Bedingungen ein:

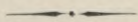
$$a_1 + a_2 + a_3 + \dots = 0 \quad \text{und} \quad b_1 + b_2 + b_3 + \dots = 0.$$

Das Joulesche Gesetz und die Formel für die elektrische Arbeit lassen sich in komplexer Darstellung jedoch nicht in einfacher, leicht deutbarer Weise darstellen.

Während die Methode der graphischen Darstellung von Wechselstromvorgängen durch Vektoren besonders geeignet ist, um einen Einblick in die gegenseitigen Beziehungen der verschiedenen sich periodisch ändernden Größen zu erlangen, so sind doch oft wegen der erheblichen Größenunterschiede die Diagramme nicht geeignet, Maßverhältnisse mit einiger Zuverlässigkeit zu entnehmen.

Für solche Fälle ist die algebraische Darstellung durch komplexe Größen wesentlich zweckmäßiger, da sie eine der Genauigkeit der Messung entsprechende Schärfe der Rechnung gestattet. Die Einsicht in die physikalischen Zusammenhänge wird allerdings durch die Ausführung rein algebraischer Operationen in keiner Weise gefördert.

Schwierige und langwierige Rechnungen werden jedoch durch den Gebrauch komplexer Größen oft sehr abgekürzt, und man gelangt auf diesem Wege gelegentlich in überraschend kurzer Zeit zu eleganten Lösungen.



6. Kapitel.

Verwendung des Wechselstromes für chemische Zwecke.

1. Chemische Wirkungen des Wechselstromes.

Da die Stromrichtung bei dem Wechselstrom fortwährend sich umkehrt, sind elektrolytische Prozesse, wie sie der Gleichstrom hervorbringt, unmöglich.

Geht der Strom in einer bestimmten Richtung durch eine Zersetzungszelle, so wird die eine Elektrode Anode, und an ihr scheidet sich das Anion aus, die andere Elektrode ist Kathode, und an ihr wird das Kation frei. Kehrt der Strom nunmehr seine Richtung um, so vertauschen die Elektroden ihre Vorzeichen. Es treten somit an beiden Elektroden beide Ionen auf. Erfolgt nun der Stromwechsel in genügend kurzer Zeit, so befinden sich beide Ionen noch im status nascens und in räumlicher Nähe, sie vereinigen sich ganz oder teilweise wieder.

Die EMK der Polarisation verschwindet dabei, die Arbeit der elektrolytischen Zerlegung wird Null, und es tritt nur eine Erwärmung der Elektrolyten nach Maßgabe des Jouleschen Gesetzes ein.

Bei niedriger Frequenz treten meist an jeder Elektrode beide Ionen auf.

Wenn man z. B. einer Wasserzersetzungszelle starken Wechselstrom von nicht zu hoher Periodenzahl zuführt, so wird an beiden Elektroden Knallgas entwickelt, aber eine viel geringere Menge, als Gleichstrom von gleicher Stärke erzeugen würde.

2. Unipolare Elektrizitätsleitung.

Es gibt eine Reihe von chemischen Verbindungen mit sogenannter unipolarer elektrischer Leitungsfähigkeit, die die Eigenschaft haben den Strom besser in der einen, als in der anderen Richtung durchzulassen, wenn sie zwischen geeignete Elektroden gebracht werden.

Schon vor 100 Jahren hatte Ermann beobachtet, daß, wenn man zwei Elektroden, die mit einer Gleichstromquelle in Verbindung stehen, in ein Stück Seife steckt, im ersten Augenblicke Elektrolyse eintritt, wodurch an der negativen Elektrode Alkali, an der positiven Fettsäure ausgeschieden wird. Letztere ist aber nichtleitend und

hemmt den Stromdurchgang. Es macht aber den Eindruck, als ob von der negativen Elektrode aus Elektrizität in den Leiter eingetreten sei. Berührt man nämlich einerseits die Seife mit feuchter Hand, anderseits den positiven Pol, so erhält man einen Schlag, wie bei Entladung eines Kondensators. Der Schlag bleibt aus, wenn man die Seife und den negativen Pol berührt.

Ähnliche Beobachtungen macht man oft, wenn man Flüssigkeiten elektrolysiert, bei welchen sich an der einen Elektrode schlecht leitende, an der Platte fest haftende Niederschläge ausscheiden.

Verwendet man z. B. Aluminium als positive Elektrode, ein Schwermetall oder Kohle als Kathode und elektrolysiert eine neutrale Lösung eines schwefelsauren Salzes (am besten Alaun), so wird der Durchgang des Stromes, wenn die Spannung unter 22 Volt beträgt, durch die Bildung einer schlecht leitenden Aluminiumverbindung oder durch die Entstehung einer dielektrischen Polarisationserscheinung nahezu völlig gehindert.

Verwendet man Wechselströme, so können die Ströme nur in der einen Richtung hindurchgehen. Man legt daher an die Pole, durch die Wechselstrom zugeführt wird, zwei solcher Aluminiumzellen oder je nach der Spannung mehr, aber in entgegengesetzter Richtung. Der Wechselstrom wird dadurch in zwei entgegengesetzt gerichtete intermittierende Gleichströme gespalten. Weitgehende Versuche in dieser Richtung haben schon vor nahezu 20 Jahren Ganz & Co. in Budapest angestellt.

In Fig. 54 ist z. B. eine Wechselstrommaschine M mit zwei Gruppen von Aluminiumzellen A und B verbunden. Die langen Striche

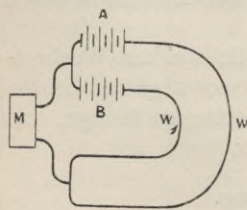


Fig. 54.
Verwandlung von Wechselstrom in Gleichstrom auf chemischem Wege.

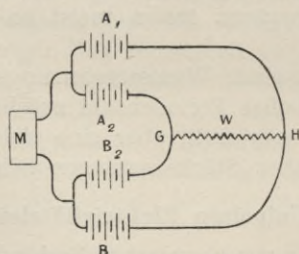


Fig. 55.

bedeuten die Aluminiumplatten, die anderen die Kohlen- oder Bleiplatten. Der Draht W ist dann von den in der einen Richtung, der Draht W₁ von den entgegengesetzt gerichteten, je eine halbe Periode des

Wechselstromes aussetzenden Gleichstromimpulsen durchflossen.

Graetz¹⁾ hat eine geschickte Schaltung angegeben, durch die es nach diesem Prinzip sogar möglich ist einen Wechselstrom in einen nicht mehr aussetzenden, sondern nur pulsierenden Gleichstrom zu verwandeln.

¹⁾ ETZ 1897, S. 424.

An jeden Pol der Wechselstromquelle M werden zwei sonst gleiche Gruppen von Aluminiumzellen in entgegengesetzter Anordnung geschaltet, (vergl. Fig. 55) $A_1 A_2$ und $B_1 B_2$. Die gleichsinnigen Endpole werden durch Drähte mit je einem Ende G und H der Nutzleitung W verbunden.

Ist nun z. B. der obere Pol der Wechselstrommaschine M positiv, so geht der Strom über A_1 H W G und B_2 nach der anderen Klemme der Maschine. Ist der untere Pol positiv, so geht der Strom über B_1 H G A_2 nach dem oberen Pol. Beide Male fließt also der Strom durch den Nutzwiderstand W in gleicher Richtung.

Man wird in jede der vier Gruppen halb soviel Zellen einschalten müssen, als der Maximalspannung E_{\max} des Wechselstromes dividiert durch 20 entspricht. Um den Widerstand möglichst klein zu machen, wird man die Platten angemessen groß wählen müssen.

Praktische Bedeutung scheint bis jetzt dieses Verfahren noch nicht gewonnen zu haben. Es liegt hier jedoch vielleicht ein Weg vor, den an der Hand messender Versuche weiter zu verfolgen, nicht aussichtslos ist. In Laboratorien, welche an Wechselstromzentralen angeschlossen sind, werden häufig Graetzsche Aluminiumzellen verwendet, um kleine Akkumulatoren auf diese Weise mit Wechselstrom zu laden und Apparate für Röntgenstrahlen mit dem elektrolytischen Wehnelt-Unterbrecher zu betreiben. Der Nutzeffekt erreicht im günstigsten Falle etwa 40%.¹⁾

Wechselstrom kann als solcher für elektrolytische Zwecke im allgemeinen nicht verwendet werden. Man kann im besonderen mit ihm keine Akkumulatoren laden und ihn nicht in der Form chemischer Anziehungskraft aufspeichern.

Von praktischer Bedeutung ist jedoch die Erzeugung von Ozon durch schwach leuchtende Entladungen hochgespannter Wechselströme von hoher Periodenzahl in Luft oder Sauerstoff.

3. Elektrolytische Kondensatoren.

Praktische Verwendung in der Elektrotechnik hat dagegen die Tatsache gefunden, daß Zersetzungszellen, die in einen Wechselstromkreis eingeschaltet werden, eine sehr erhebliche Kapazität infolge der auftretenden und verschwindenden Polarisation der Elektroden zeigen. Man benutzt daher solche Flüssigkeitskondensatoren mit Erfolg, um Phasenverschiebungen zwischen Strom und Spannung, ähnlich wie durch Kondensatoren, hervorzurufen.

¹⁾ Genauere Angaben, sowie ein vollständiges Literaturverzeichnis findet man bei König, ETZ 1902, S. 474.

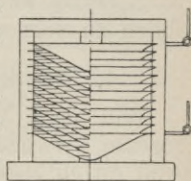


Fig. 56 Elektrolytischer Kondensator für Wechselströme.

Einen solchen elektrolytischen Kondensator kann man als eine Anzahl hintereinander geschalteter, mangelhaft isolierter Kondensatoren ansehen, deren isolierende Zwischenschicht (Dielektrikum) durchschlagen wird, sobald die Spannungsdifferenz zwischen zwei Platten die Zersetzungsspannung des Wassers übersteigt, deren Isolation aber sofort wieder selbsttätig hergestellt wird, sowie der Durchschlag erfolgt ist.

Die scheinbare Leistung, die ein solcher Kondensator absorbiert, ist $4\pi^2 \sim^2 C^2 W$; die Erwärmung ist somit dem Quadrate der Periodenzahl proportional. C ist die Kapazität, W der Widerstand des Kondensators.

Diese elektrolytischen Kondensatoren besitzen schon bei mäßiger Ausdehnung erhebliche Kapazität; sie erwärmen sich beim Gebrauche wenig, sodaß auch der Energieverbrauch in ihrem Innern nicht erheblich zu sein scheint.¹⁾

4. Erzeugung von Gleichstrom durch Wechselstrom.

Will man Wechselstrom für die Hervorbringung chemischer Prozesse verwenden, so muß er entweder in intermittierenden Gleichstrom durch einen Stromwender (Gleichrichter genannt) verwandelt werden, oder man muß den Wechselstrom zunächst zum Betriebe eines Motors verwenden, durch diesen eine Gleichstrommaschine in Bewegung setzen und deren Strom zur Erzeugung des chemischen Prozesses verwenden; oder endlich, man benutzt rotierende Umformer, das sind Dynamomaschinen, welchen durch Schleifringe einerseits Wechselstrom zugeführt wird, und denen anderseits durch Bürsten, die auf einem Kollektor schleifen, Gleichstrom entnommen wird.

Sowohl das Gleichrichten von Wechselstrom, als die Umformung von Wechselstrom in Gleichstrom durch Verbindung eines Wechselstrommotors mit einer Gleichstrommaschine ist immer mit erheblichen, unvermeidlichen Verlusten verknüpft. Ist jedoch die elektrische Energie gerade in der Form von Wechselstrom aus besonderen Gründen billig zu erlangen, so kann immerhin die ursprüngliche Erzeugung von Wechselstrom und die Umformung desselben in Gleichstrom wirtschaftlich zweckmäßig erscheinen. Es gibt eine größere Zahl von Elektrizitätswerken, bei denen ursprünglich Wechselstrom erzeugt und weithin fortgeleitet, an dem Verbrauchsort aber in Gleichstrom umgewandelt und als solcher den Konsumenten zugeführt wird.²⁾

¹⁾ Solche elektrolytische Kondensatoren bestehen zumeist aus einer Reihe von isoliert übereinander aufgestellten, schalenartigen Blechgefäßen, zwischen denen sich Natronlauge befindet, sodaß die Flüssigkeit der einen Schale die Unterseite der darüber befindlichen Schale benetzt (vergl. Fig. 56).

²⁾ Man vergleiche das letzte Kapitel dieses Buches, in dem die verschiedenen Vorrichtungen beschrieben sind, die zur Umwandlung von Wechselstrom in Gleichstrom verwendet werden können.

7. Kapitel.

Wärmewirkungen der Wechselströme.

1. Glühlampen im Wechselstrombetriebe.

Der wesentliche Unterschied in dem Verhalten des Wechselstromes im Vergleich zum Gleichstrom besteht darin, daß ersterer in jeder Sekunde viele Male seine Richtung ändert und in seiner Stärke periodisch schwankt, während der Gleichstrom stetig mit gleicher Stärke in derselben Richtung fließt. Es bedingt dies auch in den Wärmewirkungen ein etwas abweichendes Verhalten, obschon wir ja vorher festgestellt haben, daß wir einem Wechselstrom dann die gleiche effektive, mittlere Stromstärke beilegen, die ein Gleichstrom von bestimmter Ampèrezahl besitzt, wenn beide Ströme in einem gegebenen, induktionsfreien Widerstande die gleiche Wärmemenge erzeugen.

Hinsichtlich der Entwicklung der Menge von Stromwärme besteht somit zwischen beiden Stromgattungen kein Unterschied.

Die Glühlampen mit dünnen Fäden lassen bei niedriger Wechselzahl ein deutliches Flimmern erkennen. Während der Strom sinkt, durch Null hindurchgeht und allmählich wieder wächst, sinkt die Temperatur des Fadens infolge der Ausstrahlung, und die Lichtstärke nimmt merklich ab.

Bei ungefähr 30 bis 40 Perioden in der Sekunde ist dieser Temperatur- und Helligkeitsunterschied für das Auge selbst bei dünnen Fäden kaum mehr wahrnehmbar; bei Lampen mit dicken Kohlenfäden, wie sie z. B. bei Betrieb in Hintereinanderschaltung mit größeren Stromstärken verwendet werden, ist schon bei geringerer Wechselzahl für das Auge ein Flimmern nicht mehr zu erkennen, weil infolge der größeren Masse der Fäden die Temperatur der ausstrahlenden Oberfläche weniger tief sinkt.

Betrachten wir aber das Bild eines durch Wechselstrom ins Glühen gebrachten Kohlenfadens in einem rasch rotierenden Spiegel, so kann man deutlich helle und dunkle Stellen in dem leuchtenden Bande erkennen, als welches uns der glühende Faden im Spiegel erscheint. Es zeigt dies, daß die Temperatur des Kohlenfadens während einer Periode des Wechselstromes sich merklich ändert.

Die Lichtmengen, die bei gleicher effektiver Spannung und Stromstärke eine Lampe bei Wechselstrombetrieb und bei Verwendung von Gleichstrom gibt, zeigen keine Unterschiede, da die Stromwärme die gleiche ist, und das Weniger in dem einen Abschnitte der Periode durch ein Mehr in dem anderen ausgeglichen wird.

Die Lebensdauer der Glühlampen soll bei Wechselstrom etwas höher sein als bei Gleichstrom, weil bei letzterem die Austrittsstelle des Stromes aus dem Kohlenfaden etwas stärker durch Abschleuderung von Kohlenteilchen abgenutzt wird als die Eintrittsstelle; der Unterschied dürfte jedoch, wenn er überhaupt vorhanden ist, sehr gering sein.

Von großem Werte für viele Versuche mit Wechselstrom ist der Umstand, daß Glühlampen mit einfach hufeisenförmigen Kohlenfäden sehr geringe Selbstinduktion besitzen. Glühlampen sind daher als induktionslose Belastung von Wechselstromapparaten besonders geeignet.

Für Nernstlampen, die ohne weiteres auch für Wechselstrombetrieb geeignet sind, ist die Lebensdauer der Glühkörper bei Wechselstrom unzweifelhaft etwas höher als bei Gebrauch mit Gleichstrom.

2. Das Wechselstrombogenlicht.

Zunächst erscheint es merkwürdig, daß der Lichtbogen einer Bogenlampe nicht abreißt, während die Stromstärke des Wechselstromes durch Null hindurchgeht. Nachweisbar ist jedenfalls ein solches Abreißen nicht.

Hoherhitze Gase und Dämpfe besitzen infolge ihrer lebhaften Molekularbewegung eine viel bessere elektrische Leitungsfähigkeit als kalte Gase; es genügt daher schon eine mäßige Spannung, um zwischen zwei weißglühenden Kohlenstäben den Übergang der Elektrizität durch einen kleinen mit hoch erhitzter Luft erfüllten Zwischenraum hindurch einzuleiten.

Um was für einen Vorgang es sich im Lichtbogen überhaupt handelt, ist zur Zeit noch nicht sicher bekannt. Jedenfalls spielt die Überführung elektrisch geladener Kohlenteilchen oder von Gas-molekeln von der einen zur anderen Kohle eine wesentliche Rolle, sodaß in Gasen mehr von einer Übertragung der Elektrizität von einer Elektrode zur anderen (Konvektion), als von einer Leitungsfähigkeit in dem Sinne, wie wir eine solche bei den Metallen wahrnehmen, die Rede sein kann. Dazu kommt, daß an den Stellen, an denen Kohle und umgebende Gase sich berühren, wahrscheinlich elektromotorische Gegenkräfte thermoelektrischer Natur und sicher solche Gegenkräfte chemischen Ursprunges nach Art der Polarisation in den Zersetzungszellen sich entwickeln. Im Lichtbogen werden näm-

lich nicht nur durch die hohe Temperatur Zersetzungserscheinungen (Dissoziationsvorgänge) hervorgerufen, sondern es treten auch chemische Veränderungen ein, die den Erscheinungen bei der Elektrolyse vergleichbar sind.

Vielleicht hängt mit dem Vorhandensein solcher elektromotorischer Gegenkräfte der Umstand zusammen, daß beim Wechselstrombogenlicht für den gleichen Wattverbrauch etwas weniger an mittlerer Lichtstärke erzeugt wird als bei Gleichstrom.

Während bei gewöhnlichen Gleichstrombogenlampen mit verhältnismäßig kurzem Lichtbogen die positive Kohle sich durch den Lichtbogen kraterartig aushöhlt, bildet sich die negative Kohle zu einem spitzen Kegel aus (vergl. Fig. 57a); der Abbrand der positiven Kohle ist dabei ungefähr doppelt so groß als der der negativen Kohle.

Bei Wechselstromlampen bilden beide Kohlen schwach abgestumpfte Kegel. Der Abbrand ist an beiden Kohlen fast völlig gleich, an der oberen Kohle, sofern kein Kohlenparer angewendet wird, infolge des aufsteigenden Stromes erwärmter Luft um etwa 6 bis 8 % größer als an der unteren Kohle. Für Wechselstrom werden daher meist oben und unten gleich dicke Kohlenstäbe verwendet.

Der Abbrand der Kohlen erfolgt nach ähnlichen Gesetzen wie bei Gleichstrom (vergl. Gleichstromtechnik, Kap. III, 5, S. 55), ist jedoch um etwa 20 % bei Wechselstrom größer.

Die Temperatur der positiven Kohle ist bei Gleichstrom wesentlich höher als die der negativen; bei Wechselstrom liegt für einen merklichen Unterschied keine Veranlassung vor.

Bei Gleichstrombogenlampen macht man daher die positive Kohle meist zur oberen und läßt das Licht des Kraters nach unten werfen. Um gleichen Abbrand in der Längsrichtung zu erzielen, macht man bei Gleichstrom die positive Kohle dicker, bei Wechselstrom werden beide Kohlen annähernd gleich gewählt.

Für Gleichstrom wird als obere Kohle eine Dochtkohle d. h. eine Röhrenkohle gewählt, deren Hohlraum mit einem weicheren Graphit gefüllt ist, dem Kaliwasserglas oder leicht verdampfbare Salze beigemischt sind. Als negative Elektrode wird ein homogener Kohlenstab gewählt, der, um seine Verbrennlichkeit herabzusetzen, mit einer Spur Borsäure getränkt ist.

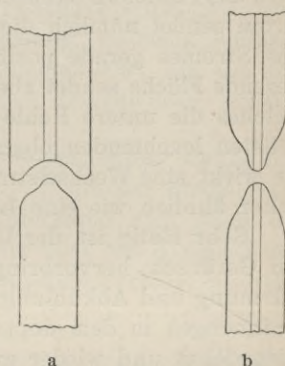


Fig. 57. a) Kohlen einer Gleichstrom-, b) einer Wechselstrombogenlampe nach längerem Brennen.

Für Wechselstrombogenlicht werden in der Praxis fast ausschließlich als obere und untere Kohlen Dochtkohlen verwendet.

Der fortwährende Richtungswechsel des Wechselstromes verursacht bei Periodenzahlen unter 40 in der Sekunde ein störend wirkendes Flimmern. Bei der in Deutschland üblichen Periodenzahl 50 ist das Flimmern nur noch schwach und bei etwa 60 Perioden gar nicht mehr bemerkbar.

Bei Lampen, die mit Glocken aus Mattglas umgeben sind, ist das Flimmern minder auffällig. Schnell bewegte Gegenstände, z. B. umlaufende Radspeichen, erscheinen im Wechselstrombogenlicht jedoch stets vielfach.

Bringt man, wie dies zuerst die E. A.-G. Helios getan hat, unmittelbar über dem Lichtbogen eine reflektierende Fläche an, so wird das Flimmern dadurch wesentlich herabgesetzt. Auch bei Wechselstrom sendet nämlich die Kohle, die infolge des Richtungswechsels des Stromes gerade positiv ist, das meiste Licht aus. Die reflektierende Fläche sendet aber einen erheblichen Teil des Lichtes zurück, welches die untere Kohle ausstrahlt, wenn sie positiv ist; deren am hellsten leuchtenden obersten Teil sieht man sonst von unten nicht. Es wirkt eine Wechselstromlampe mit Reflektor über dem Lichtbogen daher ähnlich wie eine Lampe mit doppelter Wechselzahl.

Sehr lästig ist der Umstand, daß alle Wechselstrombogenlichter ein Geräusch hervorbringen. Infolge der rasch wechselnden Erwärmung und Abkühlung der Kohlenspitzen werden die benachbarten Luftmengen in dem doppelten Takte der Periode des Wechselstromes ausgedehnt und wieder zusammengezogen. Hat die Kurve, nach der sich der Strom als Funktion der Zeit ändert, ziemlich genau die Form einer Sinuslinie (Sinoide), so ist der Ton von verhältnismäßig geringer Stärke und ziemlich musikalisch rein. Ist die Stromkurve dagegen stark verzerrt, zeigt sie ziemlich ausgeprägte Spitzen und Zacken, so tritt ein schnarrendes Nebengeräusch auf. Bei großen Stromstärken macht sich ein kräftiges Brummen bemerkbar, welches bei hohen Periodenzahlen sich dem Klange einer Trompete nähert. Bei Verwendung schlecht zubereiteter Dochtkohlen gesellt sich noch ein klatschendes bis schnatterndes Nebengeräusch hinzu.

Durch Lampenglocken werden diese Geräusche sehr gedämpft, und bei Lampen mit eingeschlossenen Lichtbogen sind diese störenden Schallerscheinungen in größerer Entfernung von der Lampe kaum wahrnehmbar.

3. Die scheinbare Phasenverschiebung bei Wechselstrombogenlicht.

Ist bei dem Wechselstrom, der einer Bogenlampe zugeführt wird, Strom und Spannung in gleicher Phase, und erfolgt der Verlauf

dieser beiden Größen rein sinoidal, so sollte die im Lichtbogen verbrauchte elektrische Arbeit gleich dem Produkte aus Stromstärke und Spannung sein. Tatsächlich ist dies jedoch niemals völlig genau der Fall.

Wenn man den wirklichen Wattverbrauch mit einem Wattmeter, Stromstärke und Spannung andererseits mit dazu geeigneten Instrumenten mißt, so findet man stets den Quotienten:

$$\frac{\text{Watt}}{\text{Stromstärke} \times \text{Spannung}} < 1.$$

Man hat daher vielfach angenommen, daß in dem Wechselstrombogenlicht eine Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung eintritt.

Genau gleichzeitige Aufnahmen der Strom- und Spannungskurven haben jedoch ergeben, daß eine erhebliche Phasenverschiebung nicht vorliegt, daß die scheinbare Phasenverschiebung vielmehr dadurch bedingt ist, daß sowohl die Gestalt der Stromkurve, als die der Spannungskurve durch das Einschalten des Bogenlichtes gewisse Veränderungen erfahren.

Da der scheinbare Widerstand eines Bogenlichtes bekanntlich (vergl. Gleichstromtechnik, Kap. III, 4, S. 53) von der Stromstärke abhängig ist, so muß der scheinbare Widerstand sich nach der doppelten Periode des Stromes ändern. Wenn aber ein Wechselstrom einen Widerstand überwindet, der mit der doppelten Periode, während einer Stromperiode also zweimal sich ändert, so legt sich über die sinoidale Welle des Stromes oder der Spannung oder beider Größen eine Welle mit dreifacher Periodenzahl. Die für sinoidale Wellen geachteten Wechselstrominstrumente würden für solche anders geformte Wellen andere Instrumentalkonstanten haben, sie zeigen somit nicht mehr richtig.

Bei Benutzung der nahezu sinoidal verlaufenden Strom- und Spannungswellen einer selbstregulierenden Westinghousemaschine mit sehr hoher Selbstinduktion zeigte bei Versuchen, die Steinmetz veranlaßte, z. B. (vergl. Fig. 58) die Spannung in jeder Halbwelle zwei sehr aus-

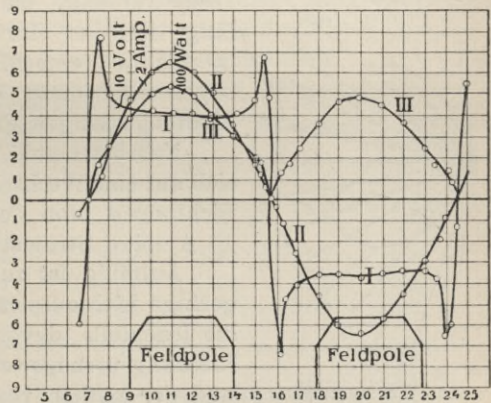


Fig. 58. Die Änderung der elektrischen Größen beim Wechselstromlichtbogen während einer Periode. I. Spannung, II. Strom, III. elektrische Arbeit.

gesprochene Spitzen mit eingesattelter Senkung. Die Stromwelle zeigte dagegen nur eine merkliche Zuspitzung durch eine übergelagerte Welle von dreifacher Periode.

Görges glaubt eine kleine Verschiebung des Stromes gegen die Spannung wahrgenommen zu haben, wie sie einem induktiven Widerstande des Lichtbogens entsprechen würde. Diese scheinbare Phasenverschiebung hängt, wie auch die übrigen charakteristischen Eigenschaften des Wechselstrombogenlichtes sehr wesentlich von dem Materiale der Bogenlichtkohlen ab. So fand z. B. Heubach für ein Wechselstrombogenlicht von 6 Ampère und 2 mm Bogenlänge:

	Watt Stromstärke \times Spannung	Scheinbarer Phasenver- schiebungs- winkel	Watt- verbrauch des Bogen- lichtes
oben und unten Dochtkohlen . .	1,0	0°	142 Watt
oben Docht- unten Homogenkohle .	0,92	23°	168 »
oben Homogen- unten Dochtkohle .	0,92	23°	159 »
oben und unten Homogenkohle .	0,82	35°	266 »

4. Die Lichtausstrahlung des Wechselstrombogenlichtes.

Die Lichtaussendung einer Wechselstrombogenlampe ist wesentlich anders geartet als die der Gleichstrombogenlampe.

Während die Gleichstrombogenlampe die größte Helligkeit ungefähr in einer Richtung aussendet, die unter einem Winkel von 40° unter der Horizontalen liegt, hat die Wechselstromlampe zwei solche Richtungen stärkster Lichtstrahlung, die je nach der Lichtbogenlänge mit der Horizontalen einen Winkel von 30 bis 50° einschließen. Bei kurzen Lichtbogen sind diese Winkel kleiner, bei großen Lichtbogenlängen größer.

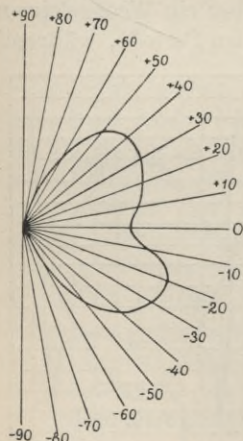


Fig. 59. Lichtausstrahlung einer Wechselstrombogenlampe in verschiedenen Richtungen.

Nebenstehende Abbildung Fig. 59 bezieht sich auf eine Wechselstrombogenlampe mit einem Lichtbogen von ungefähr 2 mm, die mit 10 Ampère Stromstärke betrieben wird.

Auffällig ist zunächst die verhältnismäßig geringe Lichtausstrahlung in der Horizontalen, die jedenfalls davon herrührt, daß in dieser Richtung vorzugsweise nur das Licht des Bogens und der seitlich von den Endflächen gelegenen Teilen der Kohlen, die schon weniger lebhaft glühen, zur Wirkung kommt.

Daß die obere Kohle ein klein wenig mehr Licht aussendet als die untere, dürfte darin begründet sein, daß die obere Kohle durch den aufsteigenden, warmen Luftstrom auf etwas höherer Temperatur erhalten wird.

Die Eigenart der Lichtausstrahlung der Wechselstrombogenlampe läßt dieselbe besser geeignet erscheinen zur Beleuchtung von Innenräumen mit reflektierenden Wänden als zur Bodenbeleuchtung auf Straßen und Plätzen.

Während Gleichstromlampen eine bessere Lichtverteilung ergeben, wenn sie hoch über dem Boden angebracht werden, ist es zweckmäßiger Wechselstrombogenlampen nicht so hoch zu hängen.

Mit voller Sicherheit hat sich gezeigt, daß die Kohle weniger Licht aussendet, wenn sie negativ ist, als wenn sie positiv ist. Das nebenstehende Diagramm (Fig. 60), welches von Görges veröffentlicht worden ist und sich auf eine Maschine mit nahezu sinusoidal Stromkurve bezieht, läßt dies deutlich erkennen. Die Lichtmessung ist hierbei in einer Richtung von 35° unter der Horizontalen erfolgt.

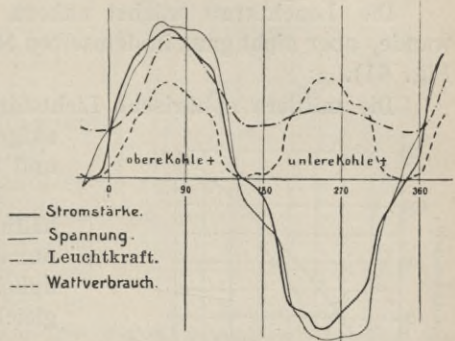


Fig. 60. Lichtentwicklung während einer Wechselstromperiode, 35° unter der Horizontalen.

Die Lichtausbeute für ein Watt aufgewendete elektrische Arbeit wächst mit der Periodenzahl und ist um so günstiger, je flacher die Gestalt der Stromkurve ist. In welchem Maße diese Einflüsse sich geltend machen, zeigen nachfolgende Mittelwerte zahlreicher Versuche, die von Roeßler und Wedding angestellt worden sind:

	Formfaktor c^*		Periodenzahl \sim	Spannung	Stromstärke
	d. Spannungs-kurve	der Strom-kurve			
Maschine mit spitzer Stromkurve	0,78	0,66	40	29,3 Volt	9,6 Amp.
Maschine mit nahezu sinusoidal Stromkurve	0,91	0,91	40	31,1 »	9,4 »
Maschine mit flacher Stromkurve	0,90	0,91	60	31,0 »	9,5 »
	0,90	0,91	80	31,0 »	9,1 »

	Lichtstärke in H. E.			Mittlere räuml. Lichtstärke für 1 Watt
	horizontal	vertikal	maximal	
Maschine mit spitzer Stromkurve	67	53	323 (40°)	0,71
Maschine mit nahezu sinusoidal Stromkurve	154	73	450 (48°)	1,02
Maschine mit flacher Stromkurve	147	70	440 (47°)	1,05
	153	80	500 (45°)	1,11

Auch Görge's findet bei spitzer Stromkurve 0,80 und für eine flache Kurve 0,96 als mittlere räumliche Lichtstärke für 1 Watt aufgewendeter Arbeit.

Es ergibt sich daraus, daß Wechselstrombogenlampen nicht endgültig in der Fabrik ausreguliert werden können, sondern daß dieselben noch einmal an der Gebrauchsstelle der Strom- und Spannungskurve entsprechend nachreguliert werden müssen.

Die Leuchtkraft wächst nahezu proportional dem Arbeitsaufwande, aber nicht ganz in demselben Maße wie bei Gleichstrom (vergl. Fig. 61).

Die mittlere sphärische Lichtstärke ist bei Gleichstrom für ein aufgewendetes Watt etwa 1 bis 1,2 HE und bei Wechselstrom 0,5 bis 0,65.

Noch ungünstiger wird das Verhältnis für Wechselstrom, wenn man nur die mittlere hemisphärische Helligkeit unter der Horizontalen vergleicht.

Roeßler und Wedding finden bei Gleichstrom die mittlere räumliche Lichtstärke unter der Horizontalen für 1 Watt Aufwand gleich 2,65 HE, für Wechselstrom je nach der Form der Stromkurve 0,7 bis

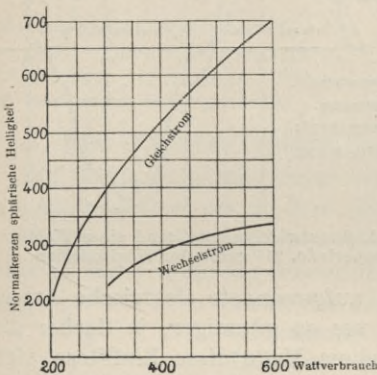


Fig. 61. Lichtstärken für verschiedenen 1,1 HE. Die Zahlen für Gleichstrom sind jedoch unverhältnismäßig hoch, weil ungewöhnlich dünne Kohlenstäbe verwendet worden sind.

Da die Spannung, mit der Wechselstrombogenlampen brennen, wesentlich niedriger ist als die von Gleichstromlampen bei gleichem Wattverbrauch, so kann man im allgemeinen bei gleicher Betriebsspannung mehr Wechselstromlampen als Gleichstromlampen hintereinander schalten.

Bei 220 Volt Gleichstrom kann man z. B. 5 Gleichstrombogenlampen von etwa 6 Ampère in Hintereinanderschaltung verwenden, die zusammen für 1320 Watt etwa 2500 NK mittlere hemisphärische Lichtstärke besitzen.

Bei 220 Volt Wechselstrom kann man 7 Lampen von etwa $9\frac{1}{2}$ Ampère hintereinander schalten; diese entwickeln bei $9,5 \times 220 = 2090$ Watt Energieverbrauch ungefähr 1800 NK mittlere hemisphärische Lichtstärke. Für Bogenlichtbeleuchtung ist somit der Gleichstrom dem Wechselstrom erheblich überlegen.

5. Zusammenhang der elektrischen Grössen bei Wechselstrombogenlicht.

Die Spannung V hängt von der Lichtbogenlänge und vom Kohlenmaterial, beziehentlich der Beschaffenheit der Dochtmasse in ähnlicher Weise ab wie bei Gleichstrom. (Vergl. Gleichstromtechnik, Kap. 3, 4., S. 50.)

Bei Verwendung von Dochtkohlen fand z. B. Heubach

für 4,4 Ampère $V = 19,8 + 2,2 l$,

» 6,5 » $V = 20,4 + 1,8 l$,

wobei V die Spannung in Volt, l die Lichtbogenlänge in mm bezeichnet.

Bei Gebrauch von Homogenkohlen und besonders harten Kohlenstiften fallen die Zahlen wesentlich höher aus.

Ähnlich steht es auch mit dem Arbeitsverbrauch; dieser ist bei Gebrauch zweier Dochtkohlen am geringsten, z. B. unter sonst gleichen Verhältnissen

Dochtkohle oben und unten	142 Watt
Dochtkohle oben und Homogenkohle unten .	168 »
Homogenkohle oben und Dochtkohle unten .	159 »
Homogenkohle unten und oben	266 »

Auch der scheinbare Widerstand (Quotient aus Spannung und Stromstärke) wächst fast genau proportional der Lichtbogenlänge, wie obenstehendes den Heubachschen Mitteilungen entnommene Diagramm Fig. 62 zeigt.

So eingehende Untersuchungen, wie sie für Gleichstrombogenlichter angestellt worden sind, liegen für Wechselstrom z. Z. noch nicht vor.

6. Die Effektbogenlampen mit Wechselstrombetrieb.

Wenn man den Kohlenstäben einer Bogenlampe erhebliche Mengen von Metallsalzen zusetzt, wird nicht nur die Farbe des Lichtes dadurch beeinflußt, sondern es kann auch der Bogen, der bei gewöhnlichen Lampen nur etwa mit 5% an der Lichtausstrahlung beteiligt ist, so stark leuchtend gemacht werden, daß er bis 25% der gesamten Lichtmenge aussendet. Gleichzeitig sinkt die zur Erhaltung des Bogens von einer bestimmten Länge erforderliche elektrische Spannung, oder man kann bei Anwendung gleicher Spannung viel längere Lichtbogen damit dauernd erhalten.

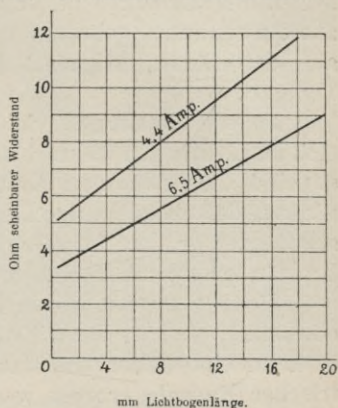


Fig. 62. Scheinbarer Widerstand des Wechselstrombogenlichtes bei Gebrauch von Dochtkohlen oben und unten.

Diese Wahrnehmungen wurden zuerst im Jahre 1881 bei der »Lampe Soleil« von Bureau und Le Clerc gemacht, bei welcher vor einem Marmorblock zwischen zwei schräg stehenden Kohlen der Lichtbogen erzeugt wurde. Der Verfasser dieses Buches hat späterhin diesen Gedanken bei einer Bogenlampe für Demonstrationszwecke zur Anwendung gebracht und statt des Marmors auch Glühkörper aus Strontianit, Magnesit und anderen Stoffen verwendet. (ETZ, 1885, S. 300.)

Da die Metallsalze viel leichter verdampfen als Kohle, und es sich im Lichtbogen wahrscheinlich um elektrolytische Vorgänge handelt, so sind die erwähnten Erscheinungen verständlich, wenn man annimmt, daß metallhaltige Lichtbögen einen geringeren Leitungswiderstand oder größere Leitfähigkeit besitzen, als der unter sonst gleichen Umständen zwischen Kohlenelektroden auftretende Bogen.

Wenn aber der Bogen länger sein kann und selbst mehr Licht aussendet, so tritt die Schattenwirkung der Kohlenstäbe zurück, und es kann eine höhere Lichtausbeute für denselben Aufwand an elektrischer Energie erzeugt werden.

Die Steigerung der Lichtausbeute bei Verwendung von Kohlen mit sehr starker Beimengung von Metalloxyden (Kohlen zweiter Art)

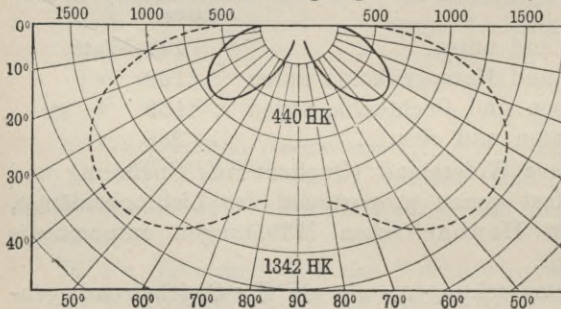


Fig. 63. Wechselstrom: 12 Amp. gewöhnliche Kohlen, 30 Volt; Effektkohlen 34 Volt.

ist aber besonders auffällig bei Wechselstrom. Dies zeigt z. B. das nebenstehende Diagramm (Fig. 63), welches Versuche der bekannten Bogenlampenfabrik von Körting & Mathiesen mit übereinandergestellten Kohlen darstellt.

Da nun aber Kohlenstäbe mit erheblichen Metalloxydbeimengungen leicht Schlacken bilden, die bei übereinandergestellten Kohlen von dem oberen Stab auf den unteren herabtropfen und die Lichtbogenentwicklung stören, so lag es nahe, die Kohlen horizontal anzuordnen oder schräg gegeneinander zu stellen. Auf diese Weise ist das Bremerlicht entstanden, welches wir bereits in der Gleichstromtechnik Kap. 3, 10., S. 71, erwähnt haben. Fig. 64 zeigt eine photographische Momentaufnahme des Lichtbogens einer Bremerlampe (Mod. C) in natürlicher Größe. Man erkennt deutlich die Schlackenränder an den Kohlenstäben und die eigentümliche Beschaffenheit des Lichtbogens.

Um das bei langem Lichtbogen so leicht auftretende lästige Wandern des Bogens zu vermeiden, wird dicht über den Kohlenenden ein Sparer aus weißem, stark reflektierendem, schwer schmelzbarem Material angeordnet, zumeist wird auch ein Paar schwacher Blasmagnete verwendet, deren magnetisches Feld den Bogen nach unten treibt. Bei stark gegeneinander geneigten Kohlen genügt sogar das von dem Strome selbst erzeugte Feld für diesen Zweck.

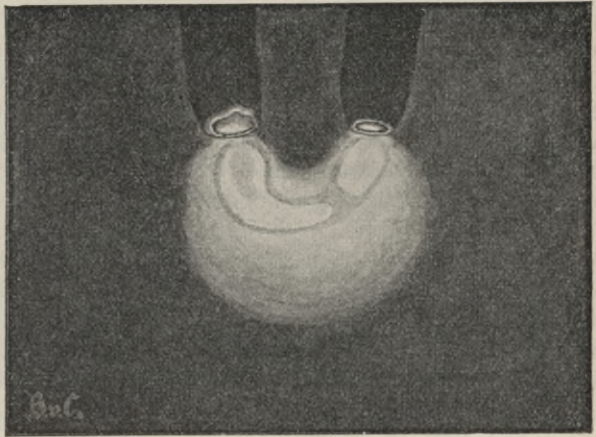


Fig. 64. Photographie des Bremerlichtes.

Am günstigsten hinsichtlich der Lichtausbeute ist das vorzugsweise durch

Beimengung von Kalksalzen (Flußspat) gelb gefärbte Licht, minder vorteilhaft ist schon das durch Beigabe von Strontiumsalsen rot gefärbte Licht, am ungünstigsten wirken Kohlen, die infolge einer vorwiegenden Beimischung von Barium weißes Licht geben.

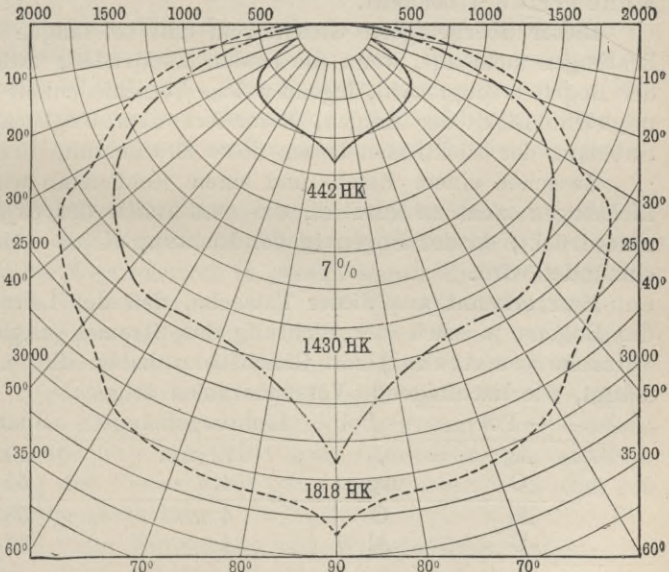


Fig. 65. Bremerlicht, Lichtverteilung bei Wechselstrom.

Zur Beruhigung des Lichtes enthalten alle derartigen Kohlen im Mantel der Dochtkohle etwas Borsäure. — Das Diagramm Fig. 65, welches

von Wedding aufgenommen worden ist, zeigt die von den übrigen Bogenlampen wesentlich abweichende Lichtverteilung und den Einfluß der Art der Beimengungen auf die Lichtausstrahlung.

Sehr störend bei allen diesen sogenannten Effektbogenlampen oder Flammenbogenlampen ist das starke Auftreten größerer Mengen von Untersalpetersäure (NO_2) und eines dicken Rauches der sich wieder verdichtenden Metalloxyde. Um störende Einwirkungen dieser Ausscheidungen auf das Werk der Lampe fern zu halten, müssen daher die beweglichen Teile derselben in eine gegen das Eindringen dieser Dämpfe gut abgedichtete Hülle eingeschlossen werden.¹⁾

Unzweifelhaft stellen diese neuen Lampen, die auf dem Gedanken des Bremerlichtes beruhen, einen sehr beachtlichen Fortschritt auf dem Gebiete der Bogenlichtbeleuchtung dar, obgleich die Ruhe und Stetigkeit des von ihnen hervorgebrachten Lichtes noch nicht der Gleichförmigkeit von Bogenlampen mit übereinanderstehenden Kohlen erster Art und normaler Bogenlänge gleichkommt.

7. Die unipolare Leitfähigkeit des Lichtbogens bei Wechselstrom.

Die Tatsache, daß man an Wechselstromlichtbogen pulsierende Gleichströme beobachten kann, die gewissermaßen dem Wechselstrom überlagert sind, ist schon lange aus Versuchen von Jamin und Maneuvrieu²⁾ bekannt.

Dieser überlagerte Gleichstrom tritt bei langen Wechselstromlichtbogen stets auf, wenn die beiden Elektroden, zwischen welchen der Bogen erzeugt wird, irgend welche Verschiedenheit zeigen; schon ungleiche Dicke der Kohlen, besonders aber Ungleichheiten in der Substanz der Elektroden lassen diese Erscheinung hervortreten.

Zwischen einem Metall- und einem Kohlenstab wird, sofern der Lichtbogen nicht zu kurz ist, die eine Hälfte der Stromkurve ganz unterdrückt, da der Bogen in der Richtung Kohle—Metall gar nicht entzündet wird.

Man erkennt aus dieser Tatsache, daß der Leitungswiderstand des Bogens je nach der Richtung des Stromes ungleich groß ist. Versuche von Arons³⁾ mit Gleichstrom haben dies auch völlig bestätigt, wie nachfolgende Versuchszahlen zeigen:

+ Pol	— Pol	Lichtbogenlänge	Spannung
Ag	C	7 mm	40 Volt
C	Ag	4,5 »	57 »
Al	C	4 mm	38 Volt
C	Al	4 »	57 »

¹⁾ Um die schädlichen Untersalpetersäuredämpfe zu binden, geben Siemens & Halske bei jedem Kohlenwechsel einige Gramm Ammoniumkarbonat $[(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3]$ in die Lampenglocke. — ²⁾ Comptes Rendus, Bd. 94, S. 1615 (1882).

³⁾ Wiedemanns Annalen, Bd. 57, S. 185 (1896).

Blondel nimmt an, daß das Wiederentzünden des Bogens nach dem Verlöschten beim Richtungswechsel des Lichtbogens durch eine Entladung erfolgt, die vom negativen Pol ausgeht. Diese Entladung geht aber leichter vor sich, wenn die stark weißglühende Kohle negativ ist, während sie nicht erfolgt, wenn das Metall negativ ist. Das Metall ist infolge seiner niedrigen Verdampfungstemperatur weniger heiß und kühlt sich infolge seiner größeren Wärmeleitfähigkeit und geringeren spezifischen Wärme rascher ab. Da aber die der Elektrode benachbarten Gase die Elektrizität um so besser leiten, je heißer sie sind, so bleibt die Entladung bei Wechselstrom aus, wenn das Metall negativ ist.

Ein sehr interessanter Fall dieser Art ist die Tatsache, daß bei Betrieb einer Quecksilberlampe mit einer Quecksilberelektrode und einer Stahlelektrode durch Wechselstrom nur pulsierender Gleichstrom in der Richtung der Stahlelektrode zur Quecksilberelektrode übergeht, wenn der Lichtbogen genügend lang ist.

Auch das etwas verschiedene Verhalten der Ober- und Unterkohle bei Wechselstrombogenlampen mit sonst gleichen Kohlenstäben findet durch diese Wahrnehmungen ihre Erklärung.

8. Allgemeines über Bogenlampen für Wechselstrom.

Im Prinzip sind alle Bogenlampenkonstruktionen für Gleichstrom auch für Wechselstrom verwendbar. In der Praxis werden für Wechselstrombetrieb fast nur Differentiallampen verwendet. Für Wechselstrombogenlampen mit eingeschlossenem Lichtbogen, die sogenannten Dauerbrandlampen, werden jedoch auch Hauptstromlampen verwendet.

In der konstruktiven Ausführung bedürfen jedoch einzelne wesentliche Bestandteile der Lampen erheblicher Abänderungen.

Wegen der bei Wechselstrom in geschlossenen Metallkörpern auftretenden starken Wechselströme, die mit Energievergeudung und Wärmeentwicklung verknüpft sind, müssen die Kerne der Elektromagneten, die in den Haupt- und Nebenschlußspulen durch ihre Bewegungen die regelnde Wirkung der Bogenlampen hervorbringen, nur aus unterteiltem Eisen oder aus geschlitzten Eisenröhren bestehen. Auch darf man, um eine möglichst gute Regulierung zu erzielen, mit der Sättigung des Eisens nicht ganz soweit gehen, als dies bei Gleichstrom zulässig erscheint.

Um auch sonst der Entstehung von Wirbelströmen entgegenzuwirken, müssen metallene Hülsen innerhalb oder außerhalb der vom Strome durchflossenen Spulen nur als geschlitzte Rohre verwendet werden.

Ferner muß berücksichtigt werden, daß Spulen, zumal aber die Wickelungen von Elektromagneten, infolge ihrer Reaktanz dem Durchgange von Wechselstrom ganz andere scheinbare Widerstände entgegenseetzen, als wenn sie von Gleichstrom durchflossen werden. Diese Spulen müssen daher unter Berücksichtigung dieses Umstandes wesentlich anders dimensioniert werden.

Von besonderem Einflusse auf die magnetischen Zugkräfte, die von den Spulen auf die in ihnen schwebenden Eisenkörper ausgeübt wird, ist die Kurvenform des Wechselstromes. Ist die Kurve des Stromes, mit dem die Lampe gespeist wird, sehr spitz, so ist der scheinbare Widerstand der Spule größer und, bei gleicher an den Klemmen auftretender effektiver Spannung, der Strom, der diese Spule durchfließt, entsprechend geringer. Bei einer Spule z. B., deren Ohmscher Widerstand 180 Ohm und deren Induktanz 300 Ohm beträgt, die also einen scheinbaren Widerstand von 350 Ohm besitzt, kann dieser Unterschied 12 % und mehr betragen.

Ist die Zahl der Ampèrewindungen, die den Eisenkern umfließt, so bemessen, daß der Eisenkern nahezu gesättigt ist, so ist die magnetische Anziehungskraft nahezu proportional der Stromstärke; ist das Eisen jedoch weit von der Sättigung entfernt, so ändert sich die Anziehungskraft nahezu proportional dem Quadrate der Stromstärke. Mit geringer Sättigung arbeitende Eisenkerne werden daher eine viel feinere Regulierung ermöglichen.

Man ersieht hieraus wieder, daß Wechselstrombogenlampen erst an der Gebrauchsstelle, der Kurvenform und Phasendifferenz, die dort vorliegt, entsprechend, endgiltig ausreguliert werden können, und daß Unterschiede in der Kurvenform und in der Phasendifferenz, die durch Wechsel in der induktionsfreien und induktiven Belastung in größeren Verteilungsnetzen leicht eintreten, die Regulierung der Wechselstrombogenlampen beeinflußt werden. Vor allem ist auch zu beachten, daß die mittlere Spannung, mit der Gleichstrombogenlampen am besten brennen, in der Nähe von 40 Volt liegt, während die mittlere Spannung bei Wechselstromlampen mit Dochkohlen nicht sehr von 28 Volt verschieden ist.

Beträgt nun der Widerstand einer im Nebenschluß gelegenen Spule einer Gleichstromlampe meist zwischen 200 und 500 Ohm, so muß der scheinbare Widerstand einer Nebenschlußspule, die einen Strom von gleicher Stärke ($\frac{1}{5}$ bis $\frac{1}{12}$ Ampère) durchlassen, und daher die gleiche magnetische Wirkung hervorbringen soll, eine Größe von 140 bis 350 Ohm haben. Der Ohmsche Widerstand wird dabei etwa nur 14 bis 25 Ohm betragen.

Um wenigstens einige Beispiele von Wechselstrombogenlampen und der Art ihrer Wirkungsweise zu geben, teilen wir im nach-

stehenden zunächst Zeichnung und Beschreibung der Lampen mit, deren sich Roeßler und Wedding bei ihren in den vorstehenden Abschnitten mehrfach erwähnten Untersuchungen bedient haben.¹⁾

9. Einrichtung von Wechselstrombogenlampen.

Die in Fig. 66 abgebildete Wechselstrombogenlampe ist eine Differentiallampe. Die beiden Spulen stehen übereinander, die Stromspule A oben, die Spannungsspule B unten. Die beiden Kohlenhalter hängen an den zwei Enden einer Kette, welche über die drehbare Kettenrolle D gelegt ist. Sobald die Kohlen abbrennen, geschieht die Nachregulierung durch Drehung von D. Da beide Kohlen gleich dick sind und nahezu gleich schnell abbrennen, so wird bei der Regulierung eine Kohle stets um ebensoviel gehoben, wie die andere gesenkt wird, sodaß der Lichtbogen annähernd in derselben Entfernung von dem Reflektor C bleibt. Zur Regulierung der Lampe wirken die beiden Spulen auf je ein aufgeschnittenes Eisenrohr a und b. Beide Eisenrohre sind durch Aufschieben auf ein aufgeschnittenes Messingrohr c fest miteinander verbunden und hängen an dem Arme E eines dreiarmigen Hebels. Bei horizontaler Lage von E hängen diese beiden Eisenkerne so, daß ihre Mittelpunkte von den Mittelpunkten der Spulen gleichweit entfernt sind, der obere um so viel über dem Mittelpunkte seiner Spule, wie der untere unter dem der seinigen. Sobald eine der Spulen vom Strome durchflossen wird, hat sie daher das Bestreben, den Eisenkern, welchen sie selbst magnetisiert, in sich hineinzuziehen. Die Wirkung der beiden Spulen ist deshalb differential.

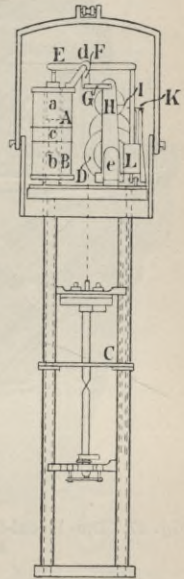


Fig. 66.

Das Regulierwerk wirkt in folgender Weise: Schickt man Strom durch die Lampe, deren Kohlen aufeinander stehen, so wirkt allein die obere Stromspule A und zieht den Kern a und damit auch den Arm E herunter. Der Vertikalarm F desselben Hebels dreht sich gleichzeitig um die Achse d nach rechts und dreht dadurch mit Hilfe der Gelenkstange G das Gestell H des Hemmwerkes mit der Rolle D um die Achse e, wodurch die Kohlen auseinander gezogen werden. Die Kuppelung zwischen H und D tritt aber erst ein, wenn der Sperrarm J durch die Bewegung von H nach rechts auf den Anschlag K geschoben ist.

¹⁾ Mit geringen Abänderungen entnommen der Abhandlung von Roeßler und Wedding, ETZ 1894, S. 318.

Sind die Kohlen so weit abgebrannt, daß die Regulierspannung erreicht ist, so zieht die Nebenschlußspule B den Kern b nach oben, bis die Kraft der abwärts ziehenden Hauptspule äquilibriert ist, und nähert die Kohlen dadurch wieder einander. Die Schwingungen des Hebelwerkés werden gedämpft durch die Luftbremse L, deren Kolbenstange durch kleine Gewichte belastet werden kann, wenn man die Lampe einreguliert.

Durch außerordentliche Einfachheit zeichnet sich die neuerdings von der Firma Ganz & Co. eingeführte Hackllampe für Wechselstrom aus.

Diese Lampe besitzt unter einem Winkel von 50° schiefstehende Kohlen (vergl. Fig. 67) und es werden in derselben nicht runde, sondern oben abgeflachte Dochtkohlen verwendet. Dadurch wird erreicht, daß der weitaus größte Teil der Lichtausstrahlung nach unten gerichtet ist. Der geringe Teil des Lichtes, der nach oben geht, wird durch einen aus isolierendem Material hergestellten Reflektor zurückgeworfen, der gleichzeitig als untere Führung für die schiefen Kohlen dient.

Durch die schräge Lage der Kohlen kann die Lampe sehr flach werden. Anstatt

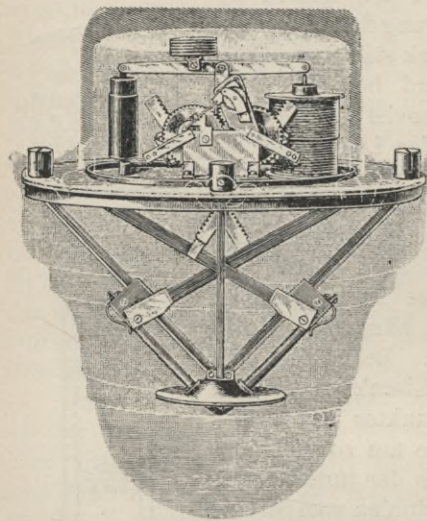


Fig. 67. Die Hackl-Bogenlampe für Wechselstrom.

einer matten Vollkugel trägt sie unten eine um ein Charnier drehbare Halbkugel. Die seitlichen Gestänge anderer Bogenlampen, die immer nach bestimmten Richtungen Schatten werfen, kommen bei dieser Art der Anordnung in Wegfall.

Die Lampen werden meist als Differentiallampen mit übereinander stehenden Spulen (rechts in der Fig. 67) gebaut. Eine gute Luftdämpfung wird durch einen in einen Hohlzylinder eintauchenden, ziemlich dicht anschließenden Zylinder mit Boden erreicht.

Die Kohlenhalter sinken durch ihr eigenes Gewicht nieder und stehen mit einem kräftigen Laufwerk in Verbindung, welches durch die Bewegung der differential beeinflussen, in den Solenoiden schwebenden Eisenkernen betätigt oder gebremst wird. Um den Lichtbogen möglichst ruhig zu machen, wird die Abstoßung des Lichtbogens durch das schwache Magnetfeld verwendet.

Die an den Klemmen der Lampe erforderliche Spannung beträgt 29 bis 30 Volt.

Die ganze Einrichtung und Wirkung der Lampe läßt dieselbe für Innenbeleuchtung geschlossener Räume und für Einbau der Lampe in die Decke besonders geeignet erscheinen.

Angeblich sollen für die mittlere hemisphärische Helligkeit einer Hefner-Einheit nur 0,52 Watt erforderlich sein, während sonst bei Wechselstrombogenlampen (vergl. S. 90) meist mindestens ungefähr 1 Watt nötig ist.

Flammenbogenlampen für Wechselstrom sind zuerst von der Deutschen Gesellschaft für Bremerlicht (Neheim und Berlin) und später auch von Siemens & Halske A.-G., der Allgemeinen Elektrizitätsgesellschaft, der Firma K. Weichert (Berlin) und vielen anderen Fabriken neuerdings in den Handel gebracht worden. Der Blasmagnet fehlt bei der Lampe der A. E.-G., eine besondere Zündvorrichtung hat nur die Bremerlampe (Mod. C), die wir im nachfolgenden beschreiben¹⁾ und abbilden. Die Zündvorrichtung ist entbehrlich, wenn die Metalloxyde, welche den Kohlen zweiter Art charakteristisch sind, nur im Dochte enthalten sind.

Bei der neuesten Bremerlampe (Mod. C, Fig. 68) erfolgt der Nachschub der Kohlen durch ein Laufwerk L, welches mittels Kette von einem in senkrechter Führung laufenden Schlitten bewegt wird, der an einer Querstange die beiden Kohlenhalter trägt. Die Kohlenhalter werden in zwei um 36° gegeneinander geneigten Stangenpaaren geführt, die außerdem den als Reflektor und Kohlensparer²⁾ dienenden Trichter R und den zur Abdichtung des Werkes bestimmten Teller T tragen.

Das Laufwerk wird durch die Differentialspulen D beeinflusst, welche außerdem durch einen Hebel RS die Spitze der einen Kohle bewegen. Am Teller befindet sich ein Blasmagnet B, dessen Wicklung vom Hauptstrom durchflossen wird. Durch Änderung der

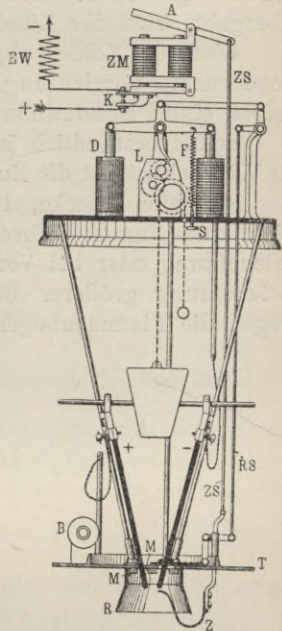


Fig. 68. Bremer-Lampe, Modell C. Schematische Darstellung.

¹⁾ Nach der Abhandlung von W. Biegou von Czudnochowski, Verhdlg. d. Deutschen Phys. Gesellsch., Bd. V (1903), S. 173.

²⁾ Vergl. Gleichstromtechnik, Kap. III, 8e, S. 67.

Spannung der Feder F, die an der Schraube S sitzt, kann die Lampe für verschiedene Klemmenspannungen einreguliert werden.

Die Zündung wird durch den Elektromagnet ZM bewirkt, der den Anker A anzieht. Die an A sitzende Zündstange ZS ist mit der einen Klemme der Lampe verbunden, der Strom läuft durch eine zweite Wickelung des Blasmagneten zum Zünder Z. Der am Zünder Z entstehende Bogen wird vom Blasmagneten nach der anderen Kohle hinüber getrieben. Sobald der Bogen zwischen den beiden Kohlen übergeht, wird der Zünderkreis stromlos.

Wenn die Kohlen abgebrannt sind, schließt eine am Zündmagneten angebrachte Vorrichtung K die Lampe kurz und schaltet statt derselben einen Ersatzwiderstand EW ein.

Selbstverständlich ist Fig. 68 nur eine schematische Zeichnung. In Wirklichkeit ist die Konstruktion der Lampe wesentlich kompakter.

Für alle Zwecke, bei welchen vollkommene Ruhe des Lichtes nicht unbedingtes Erfordernis ist, also z. B. für Straßen- und Platzbeleuchtung oder bei Verwendung mehrerer Lampen, auch für die Beleuchtung größerer Säle haben sich ihrer hohen Lichtausbeute wegen die Flammenbogenlampen rasch Eingang verschafft.



8. Kapitel.

Magnetische Wirkungen der Wechselströme.

1. Magnetisierungskurven für Eisenblech, Flusseisen, Schmiedeeisen und Gusseisen.

Führt man einen Strom von J Ampère in n Windungen um einen Raum, der mit irgend einem Material ausgefüllt ist, so ist das erzeugte magnetische Feld (vergl. Grundzüge der Gleichstromtechnik Kap. VI, 5., S. 130):

$$\Phi = \frac{4 \pi \cdot J \cdot n}{w} \cdot 10^{-1} = 1,257 \frac{J \cdot n}{w}$$

Hieraus ist $w = \frac{\lambda}{\mu Q}$ der magnetische Widerstand. Es bedeutet λ die mittlere Länge des Kraftlinienweges, Q den Querschnitt des Kraftlinienbündels und μ die magnetische Durchlässigkeit des Materiales.

In der Wechselstromtechnik wird die Stromstärke durch den effektiven Wert oder quadratischen Mittelwert $J = \frac{J_{\max}}{\sqrt{2}}$ (vergl. Kap. 1, 7., S. 13) gemessen. Führt man dies ein, so erhält man

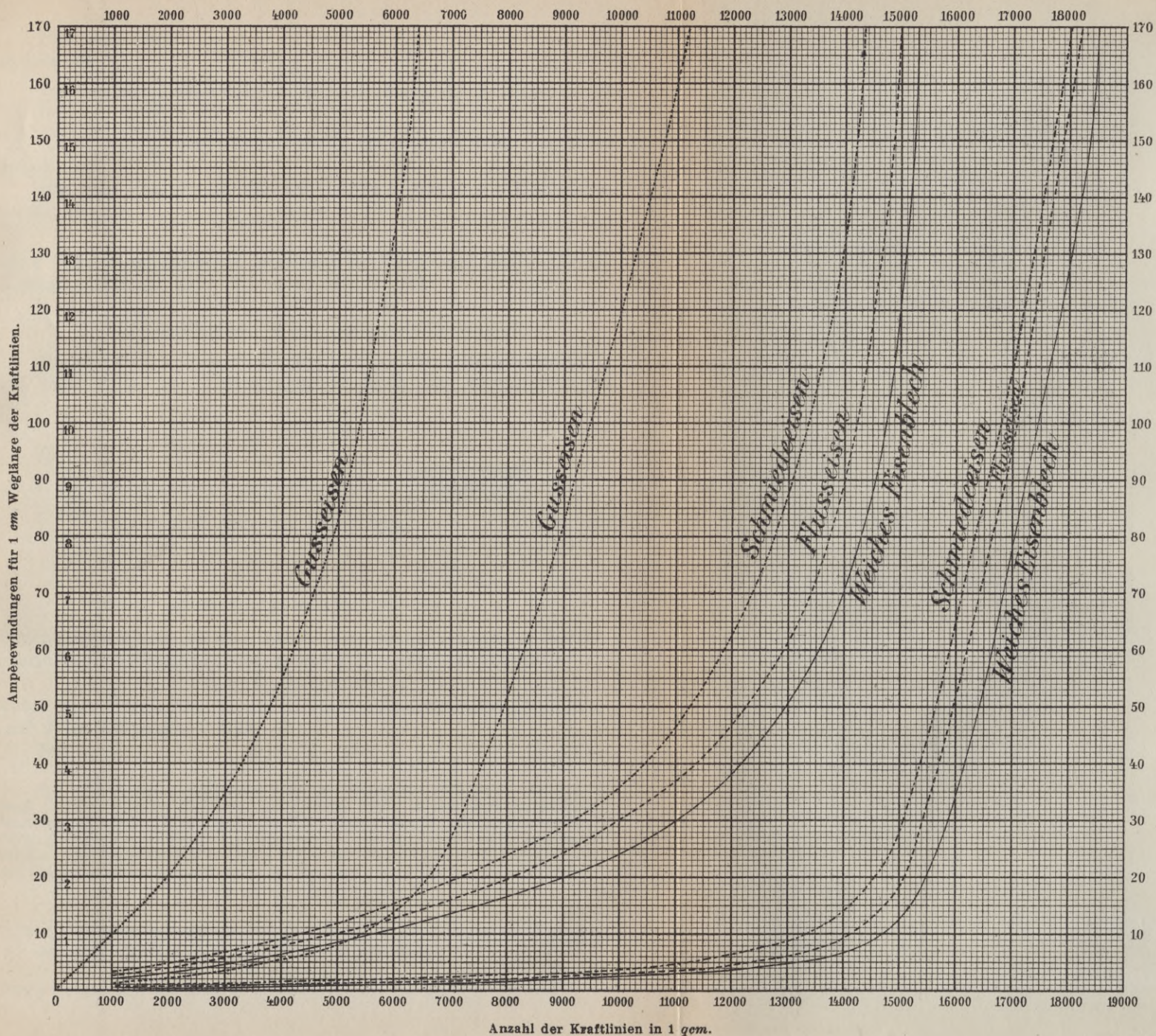
$$\Phi_{\max} = \frac{1,257 \mu \cdot Q \cdot J_{\max} \cdot n}{\lambda} = \frac{1,77 \cdot \mu \cdot Q \cdot J \cdot n}{\lambda} \quad . \quad . \quad 1)$$

Das Produkt $J n$ bezeichnet man bekanntlich als die Zahl der Ampèrewindungen. $\frac{J n}{\lambda}$ ist die Zahl von Ampèrewindungen für 1 cm Weglänge der Kraftlinien.

Da die Zahl von Kraftlinien, die eine gegebene magnetomotorische Kraft im Eisen erzeugt, nicht nur von der chemischen Beschaffenheit des Eisens, sondern auch von seiner mechanischen Herstellungsweise abhängt, so müssen wir für weiches Eisenblech, wie es zur Herstellung der Kerne der Wechselstromapparate aller Art dient, ähnliche Kurven besitzen, wie wir solche in der Gleichstromtechnik Kap. VI, 7., S. 136, für einige Eisensorten bereits mitgeteilt haben.

Die Erfahrung hat gezeigt, daß die Kurve für Eisenblech nicht völlig mit der für Schmiedeeisen gefundenen übereinstimmt.

Tafel I.



Abhängigkeit der magnetischen Induktion von der magnetomotorischen Kraft für verschiedene Eisensorten.

Nun setzt man: $1 + 4 \pi \kappa = \mu$ 7)
 und erhält¹⁾: $\mathfrak{B} = \mu \cdot \mathfrak{H}$ 8)

$\mu = \frac{\mathfrak{B}}{\mathfrak{H}}$ wird magnetische Permeabilität 9)

$\kappa = \frac{J}{\mathfrak{H}}$ wird magnetische Suszeptibilität 10)

genannt.

Hat man eine Spule von der Länge l , die aus n Windungen besteht, so ist

$$\mathfrak{H} = \frac{0,4 \pi \cdot n \cdot i}{l} \quad 11)$$

wenn i die Stromstärke ist, die durch die Windungen fließt. (Vergl. Gleichstromtechnik Kap. VI, 3., S. 128, Gl. 3.)

3. Ein ringförmiger Wechselstromelektromagnet.

Denken wir uns einen Eisenring vom wahren Eisenquerschnitt Q von einer Spule von n Windungen umgeben, die einen Ohmschen

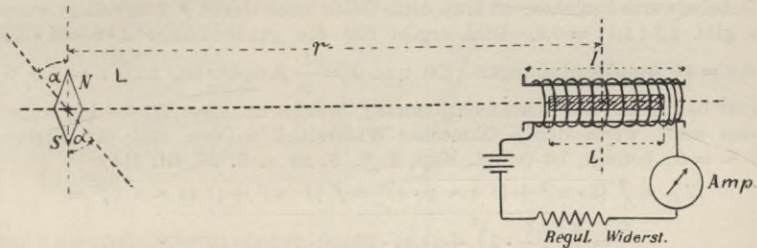


Fig. 69. Anordnung zur Messung der Größe J , \mathfrak{B} , \mathfrak{H} , μ , κ .

Widerstand w besitzt, so wird, um die Momentanstromstärke i_t hervorzubringen, ein Momentanwert e_t der EMK nötig sein, dann ist

$$e_t = i_t \cdot w + n \cdot \sin \alpha,$$

wobei $\tan \alpha$ (vergl. Kap. 2, 1., S. 21) die Änderung der Kraftlinienzahl Φ im Zeitpunkte t mißt.

Nun ist $\Phi_t = \mathfrak{B}_t \cdot Q$.

¹⁾ Um \mathfrak{B} in einem gegebenen Falle zu bestimmen, stellt man, wie Fig. 69 zeigt, den betreffenden Eisenstab samt seiner Spule in eine zum magnetischen Meridian senkrechte Richtung in der Entfernung r vor eine Magnetnadel, sendet durch die Spule einen Strom von bekannter, an einem Ampèremeter gemessener Stärke, und beobachtet die Ablenkung α der Magnetnadel. Man findet dann die magnetische Intensität J nach der Formel:

$$J = \frac{Q \cdot \mathfrak{H}}{\lambda} \cdot r^3 \cdot \mathfrak{H}_\varepsilon \cdot \left(1 - \frac{1}{2} \frac{\mathfrak{H}^2}{r^2}\right) \cdot \tan \alpha.$$

\mathfrak{H}_ε ist die Horizontalintensität des Erdmagnetismus; in Mitteldeutschland $\mathfrak{H}_\varepsilon = 0,19$.

Nummehr berechnet man \mathfrak{H} nach Gl. 11) und findet

$$\mathfrak{B} = \mathfrak{H} + 4 \pi J.$$

Damit ergibt sich nach Gl. 9) μ und nach Gl. 10) die Größe κ .

Die Änderung der Kraftlinienzahl hängt aber einmal ab von den konstruktiven Eigenheiten der Spule (Windungszahl, Länge), von der Art, wie sich die magnetische Induktion mit der magnetomotorischen Kraft ändert, also von der Gestalt der Hysteresiskurve der Eisensorte, und endlich von der Art, wie sich die Stromstärke ändert, also von der Gestalt der Stromkurve.

1. Beispiel:

Wir wollen unter der Annahme, daß L eine Konstante sei, einen solchen in sich geschlossenen ringförmigen Elektromagneten berechnen.

Die Länge des Kraftlinienweges beträgt $\lambda = 50 \text{ cm}$, der Querschnitt des Ringes $q = 10 \text{ qcm}$. Es soll die Windungszahl bestimmt werden, die nötig ist, um $\Phi = 70000$ Kraftlinien in diesem Wechselstrommagneten durch einen effektiven Strom von $J = \frac{1}{8} = 0,125$ Ampère hervorzubringen.

$$\text{Die magnetische Induktion ist } \mathfrak{B} = \frac{\Phi}{q} = 7000.$$

Nach der Kurve Tafel I beträgt für $\mathfrak{B} = 7000$ und bestes Eisenblech die Zahl der Ampèrewindungen etwa 1,1 pro 1 qcm Länge des Kraftlinienweges. Da wir die Stromstärke aber in effektiven Werten messen und sich obige Zahlen auf Scheitelwerte beziehen, so muß diese Größe noch durch $\sqrt{2}$ dividiert werden. Dies gibt $1,1 : 1,41 = 0,8$. Dies ergibt für die ganze Länge $J \cdot n = \lambda \cdot 0,8 = 50 \cdot 0,8 = 40$ Ampèrewindungen. Da nun $J = \frac{1}{8}$ Ampère ist, muß $n = 320$ Windungen betragen. Die Klemmenspannung, welche an diese Wicklung angelegt werden muß, wenn deren Ohmscher Widerstand 2 Ohm und die Periodenzahl $\sim = 50$ beträgt, ist (vergl. Kap. 2, 1., S. 29 u. S. 26, Gl. 7):

$$\begin{aligned} E_G &= \sqrt{(J \cdot w)^2 + (2 \pi \sim \mathfrak{L} \cdot J)^2} = \sqrt{(J \cdot w)^2 + (4,44 \sim n \Phi)^2} = \\ &= \sqrt{\left(\frac{1}{8} \cdot 2\right)^2 + (4,44 \cdot 50 \cdot 320 \cdot 70000 \cdot 10^{-8})^2} \\ E_G &= \sqrt{\left(\frac{1}{4}\right)^2 + 49,7^2} = 49,7 \text{ Volt.} \end{aligned}$$

Man sieht, daß $J \cdot w$ unbedenklich hätte vernachlässigt werden können.

2. Beispiel:

Es soll die Breite x des Luftspaltes einer Drosselspule berechnet werden (Abbildung 32, S. 43), die bei 70 Volt Spannung einen Strom von 10 Ampère durchlassen soll, wenn die Windungszahl $n = 400$, der Ohmsche Widerstand der Windungen 0,2 Ohm, der Eisenquerschnitt $q = 10 \text{ qcm}$ und die Periodenzahl $\sim = 50$ ist. Die mittlere Weglänge der Kraftlinien im Eisen mag 40 cm betragen.

Da der Ohmsche Widerstand klein ist, vernachlässigen wir $J \cdot w$ und berechnen zunächst (nach Kap. 2, 2., S. 29, Gl. 13):

$$\Phi = \frac{E \cdot 10^8}{4,44 \sim \cdot n} = \frac{70 \cdot 10^8}{4,44 \cdot 50 \cdot 400} = 78800.$$

Dann ist

$$\mathfrak{B} = \frac{\Phi}{q} = \frac{78800}{10} = 7880.$$

Nach Taf. I sind bei bestem Eisenblech für $\mathfrak{B} = 7880$ ungefähr 1,4 (effektive) Ampèrewindungen für jedes Zentimeter Länge des Kraftlinienweges im Eisen erforderlich, auf 40 cm somit $1,4 \cdot 40 = 56$ Ampèrewindungen.

Im ganzen sind $n \cdot i = 10 \cdot 400 = 4000$ Ampèrewindungen vorhanden, davon entfallen 56 auf den Kraftlinienweg im Eisen; somit sind $4000 - 56 = 3944$ erforderlich, um die Kraftlinien durch den Luftspalt zu treiben.

Nun ist aber (vergl. Kap. 2, 2, S. 30, Gl. 16):

$$\mathfrak{B} = 1,77 \cdot \frac{\mu \cdot J \cdot n}{x},$$

somit, da $\mu = 1$ ist:

$$x = \frac{1,77 J n}{\mathfrak{B}} = \frac{1,77 \cdot 3944}{7880} = 0,88 \text{ cm.}$$

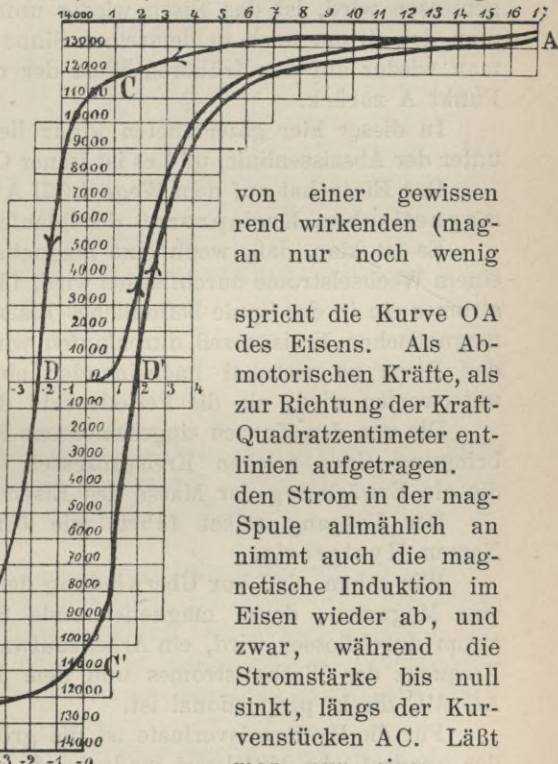
Wegen der unvermeidlichen magnetischen Streuung wird man den Luftspalt etwas kleiner wählen.

4. Magnetische Kreisprozesse, Hysteresis.

Wir haben schon in den Grundzügen der Elektrotechnik (Kap. V, 18., S. 116) darauf hingewiesen, daß, wenn ein zunächst unmagnetisches Stück Eisen von null anfangend, allmählich wachsenden, magnetisierenden Kräften unterworfen wird, die magnetische Induktion ebenfalls allmählich wächst und Stärke der magnetisierend wirkenden (magnetomotorischen) Kraft mehr zunimmt.

In der Fig. 70 entzissen sind die magneto-Ordinaten die in einem linien senkrecht gelegenen haltene Anzahl von Kraft-

Wenn man hierauf netomotorisch wirkenden Stärke abnehmen läßt, so



von einer gewissen rend wirkenden (magnan nur noch wenig

spricht die Kurve OA des Eisens. Als Abmotorischen Kräfte, als zur Richtung der Kraft-Quadratzenmeter entlinen aufgetragen.

den Strom in der magnetisierenden Spule allmählich an nimmt auch die magnetische Induktion im Eisen wieder ab, und zwar, während die Stromstärke bis null sinkt, längs der Kurvenstücken AC . Läßt man nun einen von null an beginnenden,

Fig. 70. Der magnetische Kreisprozeß eines Wechselstromes.

an Stärke zunehmenden Strom in entgegengesetzter Richtung durch die magnetisierend wirkende Spule fließen, so bedarf es schon einer nicht unerheblichen, magnetomotorisch wirkenden Kraft von der

Größe OD, um das Eisenstück wieder völlig unmagnetisch zu machen. Diese Größe OD mißt die Koerzitivkraft des Eisens.

Läßt man die im entgegengesetzten Sinne wirkenden magnetisierenden Kräfte noch weiter wachsen, so nähert sich die Zahl der entgegengesetzt gerichteten Kraftlinien wieder mehr und mehr der früher erhaltenen Zahl.

Läßt man nunmehr wiederum die Stärke des magnetisierend wirkenden Stromes sinken, so nimmt auch die Kraftlinienzahl wieder längs des Kurvenstückes A'C' ab. Wenn der Strom null geworden ist, ist noch die durch die Ordinate OC' gemessene, entgegengesetzt gerichtete Anzahl Kraftlinien vorhanden.

Erst wenn wieder ein elektrischer Strom in der ursprünglichen Richtung fließt, sodaß seine magnetomotorische Wirkung durch OD' gemessen wird, ist das Eisen wieder unmagnetisch geworden. Läßt man den Strom noch in demselben Sinne weiter wachsen, so kommt man wieder auf den früheren Wert der magnetischen Induktion bei Punkt A zurück.

In dieser hier gezeichneten Figur liegt A so hoch über, als A' unter der Abszissenlinie, und es ist ferner $OC' = OC$ und $OD' = OD$.

Das Eisen hat auf dem Wege ACD A'C'D'A einen vollständigen magnetischen Kreisprozeß durchlaufen.

Es ist klar, daß, wenn eine magnetisierend wirkende Spule von einem Wechselstrom durchflossen wird, für jede Periode des Wechselstromes ein in der Spule befindliches Eisenstück einmal einen solchen magnetischen Kreisprozeß durchlaufen wird, daß also in 1 Sekunde das Eisen so viele Male nacheinander einem solchen Kreisprozesse unterworfen wird, als die Periodenzahl des Wechselstromes angibt.

Die von den Kurven eingeschlossene Fläche mißt die zur Hervorbringung eines solchen Kreisprozesses erforderliche Arbeitsmenge, die als Erwärmung der Masse des Eisens in Erscheinung tritt.

Der Vorgang selbst führt, wie bereits früher erwähnt, den Namen Hysterisis.

Wir sehen, daß zur Überwindung der Hysterisis der Eisenkerne von Magneten, deren magnetisierende Spule von einem Wechselstrom durchflossen wird, ein Arbeitsaufwand erforderlich ist, der der Frequenz des Wechselstromes und dem Flächeninhalte der Schleife AC'A'C direkt proportional ist.

Für die Hysterisisverluste ist die größte Kraftlinienmenge, nicht der quadratische Mittelwert maßgebend.

Durch sorgfältige Untersuchungen hat Steinmetz den Arbeitsverbrauch durch Hysterisis bestimmt und gefunden, daß derselbe in seiner Abhängigkeit von der Kraftliniendichte annähernd durch die empirische Formel

$$A_H = \eta \cdot \mathfrak{B}_{\max}^{1,6} \dots \dots \dots 12)$$

dargestellt werden kann.¹⁾ A_H ist der Arbeitsverlust in absoluten Arbeitseinheiten in Erg für 1 ccm Eisen, \mathfrak{B}_{\max} die höchste Feldstärke, die im Kreisprozesse erreicht wird, η ist eine Konstante, deren Wert je nach der Eisensorte zwischen 0,0012 und 0,0025 liegt. Der Hysteresisverlust V_h in einem Wechselstrommagneten ist hiernach:

$$V_h = V \cdot \sim \cdot \eta \cdot \mathfrak{B}_{\max}^{1,6} \cdot 10^{-7} \text{ Watt} \quad 13)$$

Für vorzügliches Eisenblech, wie es nur selten zum Aufbau von Wechselstromapparaten zur Verfügung steht, setzt man etwa $\eta = 0,0012$, für mitteliges $\eta = 0,0018$. In nachstehendem Diagramm Fig. 71²⁾ sind die Arbeitsverluste durch Hysteresis für verschiedene Periodenzahlen ausgedrückt in Watt, bezogen auf 1 Kubikdezimeter Eisen in ihrer Abhängigkeit von der Feldstärke dargestellt.

Da die Hysteresisverluste dem Volumen und somit auch dem Gewichte des Eisens direkt proportional sind, so kann man mit Hilfe dieses Diagramms in jedem Falle die Größe des Hysteresisverlustes in Watt ermitteln.

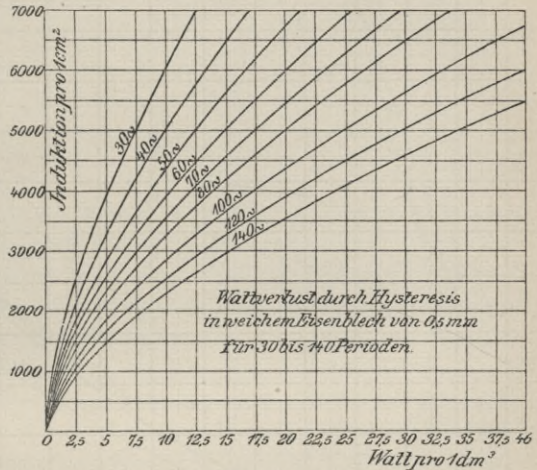


Fig. 71.

Für die Periodenzahl $\sim = 50$ enthält die umstehende Figur (Fig. 72) die Hysteresisverluste in Watt für 1 Sekunde, bezogen auf 1 kg Eisen. Die obere Kurve gilt für mitteliges, die untere für vorzügliches Material.

Die außerdem eingezeichnete gestrichelte Linie gibt für dieselben Werte der magnetischen Induktion in obigen Eisensorten den Betrag der magnetischen Permeabilität μ (vergl. Gleichstromtechnik V, 16., S. 114, Gl. 9); es ist dies eine Größe, deren man oft bedarf, wenn man die magnetischen Widerstände des mittleren Weges von Kraftlinien berechnen will.

Es muß hierbei darauf hingewiesen werden, daß die Erfahrung gezeigt hat, daß die magnetische Permeabilität aus Versuchen mit

¹⁾ Nach Ewings und Miss Klaasens neueren Untersuchungen gibt die Formel $A_H = \eta \cdot \mathfrak{B}_{\max}^{1,5}$ bessere Übereinstimmung als die Formel von Steinmetz

²⁾ Von E. Kolben herrührend.

Gleichstrom stets größer gefunden wird als aus Versuchen mit Wechselstrom. Der Unterschied ist umso größer, je höher die Wechselzahl ist. Daher ist auch der Verlust durch Hysterisis bei Wechselstrom stets größer als bei gleicher magnetischer Induktion \mathfrak{B} für Gleichstrom.

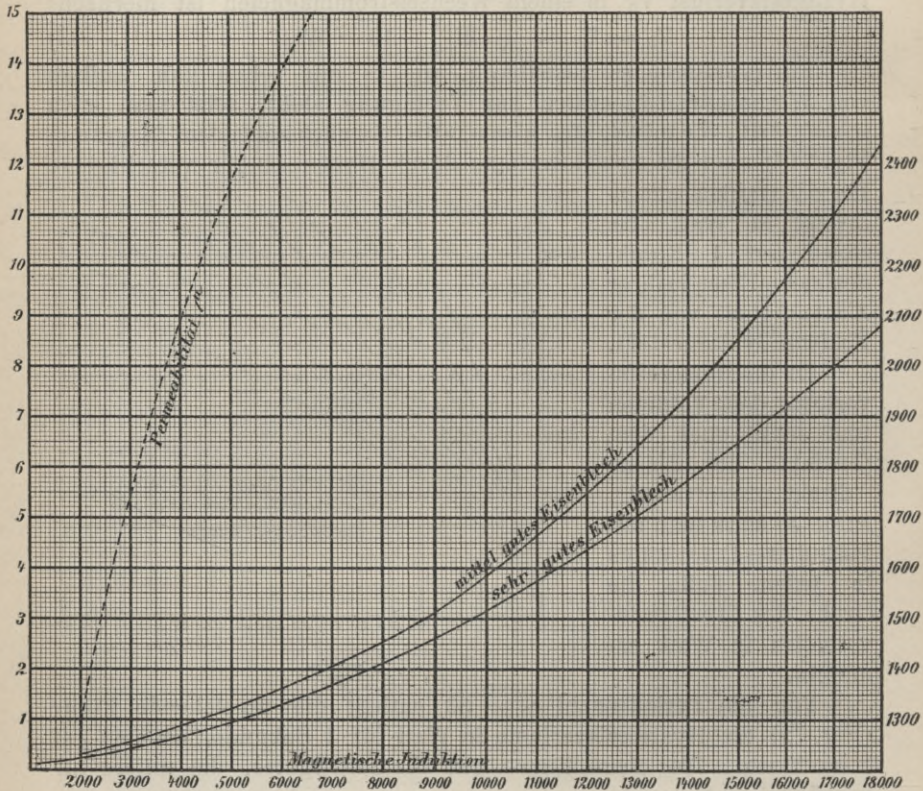


Fig. 72. Wattverlust in 1 kg durch Hysterisis für $\sim = 50$ und Permeabilität des Eisens in ihrer Abhängigkeit von der magnetischen Induktion $\mathfrak{B}_{\text{max}}$.

5. Über Wechselstrom-Elektromagneten.

Bei der Bestimmung von Elektromagneten, durch deren Windungen Wechselströme fließen sollen, kann man nicht in der einfachen Weise verfahren, wie bei Gleichstrom-Elektromagneten. (Vergl. Gleichstrom-technik Kap. VI, 7., S. 134.)

Den Ausdruck $\frac{4\pi n^2}{w}$ haben wir mit dem Namen Selbstinduktionskoeffizienten \mathcal{L} bezeichnet, wobei n die Windungszahl des Wechselstrommagneten, w der magnetische Widerstand des Kraftlinienweges ist.

Bekanntlich ist:

$$w = \frac{\lambda}{\mu Q},$$

wenn λ die Länge der mittleren Kraftlinie, μ die magnetische Permeabilität des Materiales, Q der Querschnitt ist.

Hieraus folgt sofort für den Kraftlinienstrom Φ

$$\Phi_{\max} = \frac{4 \pi J_{\max} \cdot n}{w} = \frac{\mathcal{Q} J_{\max}}{n} \text{ in absoluten Einheiten}$$

oder $\Phi_{\max} = \frac{\mathcal{Q}}{n} \cdot J_{\max} \cdot 10^8$ in praktischen Einheiten (Ampère, Henry).

Soll die Stromstärke aber als gemessene (effektive) eingeführt werden, so ergibt sich:

$$\Phi_{\max} = \sqrt{2} \cdot \frac{\mathcal{Q}}{n} \cdot J_{\text{eff}} \cdot 10^8.$$

Hieraus folgt dann:

$$\mathcal{Q} = \frac{\Phi_{\max} \cdot n}{\sqrt{2} \cdot J_{\text{eff}}} \cdot 10^{-8} \text{ oder } \mathcal{Q} = \frac{4 \pi n^2 \mu Q}{\lambda} \cdot 10^{-8} \text{ Henry} \quad . \quad . \quad 14)$$

Letztere Formeln werden häufig zur näherungsweisen Berechnung des Selbstinduktionskoeffizienten verwendet.

Der Widerstand der Wickelung eines Gleichstrommagneten nimmt proportional der Anzahl der Windungen zu; der induktive Widerstand einer um einen Eisenkern gewickelten Spule, die von einem Wechselstrom durchflossen wird, ändert sich aber proportional $2 \pi \sim L$ und der Selbstinduktionskoeffizient ist proportional dem Quadrate der Windungszahl. Man gibt Wechselstrom-Elektromagneten daher meist nur wenig Windungen, die man von einem kräftigen Strom durchfließen läßt. Um den starken Strom zu leiten, ohne gleichzeitig den Draht hoch zu erwärmen, wählt man dicken oder mehrere parallel geschaltete Drähte. Der Ohmsche Widerstand w und der Spannungsverlust $J \cdot w$ infolge desselben ist daher bei Wechselstrom-Elektromagneten meist so gering, daß vielfach der Spannungsabfall $J \cdot w$ ohne erheblichen Fehler vernachlässigt werden kann.

Sollen ein Wechselstrommagnet und ein Gleichstrommagnet gleiche Arbeitsleistungen hervorbringen, so muß man bedenken, daß die Arbeitsleistung eines Wechselstromes gleich $E \cdot J \cdot \cos \varphi$ und die eines Gleichstromes gleich $E \cdot J$ ist. Da nun $\cos \varphi$, der Cosinus des Winkels der Phasenverschiebung, stets kleiner als 1 ist, so folgt hieraus, daß bei gleichen Werten von E die Stromstärke eines Wechselstrommagneten im Verhältnis von $\frac{1}{\cos \varphi}$ größer sein muß als die Stärke des Stromes, der die Windungen des Gleichstrom-Elektromagneten durchfließt.

Wenn ein Wechselstrom durch die Spule eines Elektromagneten fließt, so tritt im allgemeinen zwischen dem Strom und der zugehörigen EMK infolge der Selbstinduktion eine Phasenverschiebung ein. — Statt nun, wie wir es früher getan haben, die EMK in zwei Komponenten zu zerlegen, von denen die eine, die wirksame, effektive Spannung, mit dem Strome in gleicher Phase ist, während die andere, die der elektromotorischen Gegenkraft der Selbstinduktion entsprechende Komponente, hierzu senkrecht ist, können wir auch den in der Leitung fließenden Strom in zwei Komponenten zerlegen, in eine Komponente von der Größe $J \cdot \cos \varphi$, die mit der EMK in gleicher Phase ist, und eine hierzu senkrechte Komponente $J \cdot \sin \varphi$. (Vergl. Fig. 73.) Die erste ist der Nutzstrom oder Wattstrom, die andere die wattlose Stromkomponente, die keine Arbeit leistet, sondern nur zur Erregung des magnetischen Feldes dient. Wenn wir,

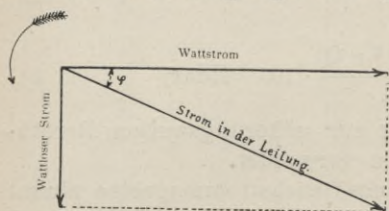


Fig. 73. Zerlegung des Stromes in zwei Komponenten.

wie dies meist geschieht, die Drehrichtung der die Wechselgrößen darstellenden Vektoren entgegen der Uhrzeigerrichtung wählen, muß die wattlose senkrecht nach unten abgetragen werden, da der Strom in der Leitung hinter der Klemmenspannung um den Winkel φ zurückbleibt.

Da während der Magnetisierung durch einen Wechselstrom ein Teil der Stromenergie für Überwindung der Hysterisis im Eisen und zur Erzeugung von Wirbelströmen verbraucht wird, so ist die Stromkomponente, die mit der Klemmenspannung in gleicher Phase ist, nicht reiner Nutzstrom, sondern ein Teil dieses Stromes wird zur Leistung der Arbeit der Hysterisis und der Wirbelströme im Wechselstrom-Apparate selbst verbraucht und in den Eisenteilen des Apparates in Wärme verwandelt.

Nennen wir die in einer Sekunde für Hysterisis und Wirbelströme verbrauchte Energiemenge (gemessen in Watt) A_h , so ist der für Leistung dieser Arbeit verbrauchte Strom i_h

$$i_h = \frac{A_h}{e_{\text{eff}}} \dots \dots \dots 15)$$

wenn e_{eff} die effektive Spannung ist.

Die wattlose Stromkomponente i_μ ist, wenn man mit \mathfrak{B} die magnetische Induktion im Kern des Magneten, mit λ die mittlere Länge des Kraftlinienweges, mit n die Anzahl der Windungen und mit μ die magnetische Permeabilität des Materiales versteht, gleich:

$$i_{\mu} = \frac{\mathfrak{B} \cdot \lambda}{\sqrt{2} \cdot 1,26 \cdot n \cdot \mu} = \frac{\mathfrak{B} \cdot \lambda}{1,78 \cdot n \cdot \mu} \dots 16^1)$$

Verläuft der Weg der Kraftlinien nicht wie bei einem Ringe durchaus in Eisen gleicher Art, so tritt an die Stelle $\frac{\lambda}{\mu}$ eine Summe ähnlicher Größen $\frac{\lambda_1}{\mu_1} + \frac{\lambda_2}{\mu_2} + \frac{\lambda_3}{\mu_3} + \dots$, wobei $\frac{\lambda_m}{\mu_m}$ das Verhältnis der Weglänge der Kraftlinien zur Permeabilität in den verschiedenen Materialien ist.

Der gesamte Magnetisierungsstrom i_0 , d. h. der Strom, der die Windungen des Elektromagneten durchfließen muß, auch wenn kein Nutzstrom vorhanden ist, wird hiernach:

$$i_0 = \sqrt{i_h^2 + i_{\mu}^2} \dots 17)$$

Bei Transformatoren, Elektromotoren und ähnlichen Wechselstromapparaten nennt man i_0 den Leerlaufstrom.

Es bedarf kaum der besonderen Erwähnung, daß es einen solchen Leerlaufstrom auch gibt, wenn statt eines Elektromagneten mit positiver Selbstinduktion in der Strombahn des Wechselstromes eine Kapazität, Kondensatoren oder Zersetzungszellen mit negativer Selbstinduktion (vergl. Kap. 4, Fig. 42., S. 55) vorhanden sind.

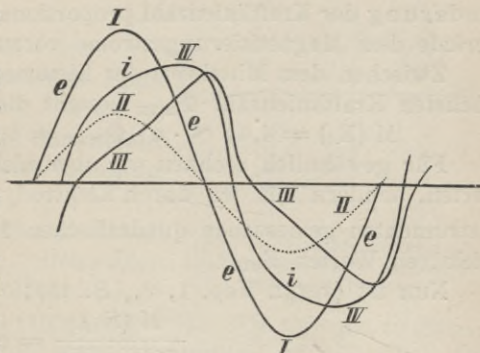


Fig. 74. Kurven der EMK (I), des Nutzstromes (II), des Magnetisierungsstromes (III) und des Gesamtstromes (IV) in den Windungen eines Wechselstrommagneten.

Da, wie bekannt, im Eisen keine genaue Proportionalität zwischen magnetisierender Kraft und erzeugter Kraftlinienzahl besteht, so wird die Form der Kurve, durch die die Abhängigkeit des Stromes von der Zeit dargestellt wird, bei dem Magnetisierungsstrome nicht unerheblich von der Sinusform abweichen, auch wenn die erregende EMK ursprünglich sich nahezu nach einer Sinoide änderte.

In Fig. 74 stellt beispielsweise für einen Wechselstrom-Elektro-

¹⁾ Nach der in den Grundzügen der Gleichstromtechnik (Kap. VI, 5., S. 130, Formel 10) mitgeteilten Gleichung ist:

$$\mathfrak{B} = \mu \cdot \frac{4 \pi \cdot i \cdot n}{10 \lambda}$$

Hieraus folgt sofort, wenn man im vorliegenden Falle zur Unterscheidung für i den Buchstaben i_{μ} gebraucht, die obige Formel.

Der Faktor $\sqrt{2}$ bezieht sich darauf, daß i_{μ} hier den Effektivwert der Stromstärke bedeutet.

magneten Kurve I die Kurve der durch den Anschluß an ein Wechselstromnetz aufgedrückten EMK vor, II ist die Kurve des mit dieser in der Phase übereinstimmenden Nutzstromes, III die Kurve des Magnetisierungsstromes, und endlich ist IV die Kurve des Gesamtstromes.

Die in dem Eisenkerne eines Elektromagneten erzeugte höchste magnetische Induktion \mathfrak{B}_{\max} ist stets von der aufgedrückten Wechselspannung E_t abhängig. Der Verlauf der Kurve der Zahl der Kraftlinien folgt in der Hauptsache dem Magnetisierungsstrome (Kurve III in Fig. 74); die in den Windungen des Elektromagneten dadurch induzierte EMGegenkraft der Selbstinduktion ist an jeder Stelle der Änderung der Kraftlinienzahl proportional und daher um eine Viertelperiode dem Magnetisierungsstrom voraus.

Zwischen dem Mittelwert der Klemmenspannung $M(E_t)$ und der höchsten Kraftlinienzahl Φ_{\max} besteht die Beziehung (S. 29, Gl. 13):

$$M(E_t) = 4,44 \sim n \cdot \Phi_{\max} = 4,44 \sim n \cdot Q \cdot \mathfrak{B}_{\max}.$$

Für gewöhnlich rechnen wir aber nicht mit gewöhnlichen Mittelwerten, sondern mit den durch Elektrodynamometer oder Hitzdrahtinstrumenten gemessenen quadratischen Mittelwerten $\sqrt{M(E_t^2)}$ oder effektiven Werten E_{eff} .

Nun ist (vergl. Kap. 1, 8., S. 13):

$$\frac{M(E_t)}{\sqrt{M(E_t^2)}} = c$$

der Formfaktor der Wechselstromkurve, folglich:

$$E_{\text{eff}} = \frac{4,44 n \cdot \sim Q \cdot \mathfrak{B}_{\max}}{c} \cdot 10^{-8} \text{ Volt}, \mathfrak{B}_{\max} = \frac{c \cdot E_{\text{eff}}}{4,44 n \cdot \sim Q} 10^{+8} \cdot 18)$$

Der Faktor 10^{-8} rührt her von dem Übergange von absoluten elektromagnetischen zu praktischen Einheiten, das sind hier Volt.

Sowie die Form der Kurven wesentlich von der Sinuslinie abweicht, und Strom- und Spannungskurve nicht mehr in der Gestalt ähnlich sind, kann auch von einer Phasenverschiebung im ursprünglichen Sinne nicht mehr gesprochen werden, da Maxima und Minima und Durchgänge durch die Nullage nicht mehr wie bei einer Sinuskurve symmetrische Lagen haben.

Streng genommen hat dann jede Ordinate des Stromes eine verschiedene Phasenverschiebung gegenüber der zugehörigen Ordinate der Spannungskurve; man kann daher nur noch von einem Mittelwerte φ der Phasenverschiebung reden.

Man nennt dann den Faktor, mit dem man $e_{\text{eff}} \cdot i_{\text{eff}}$ multiplizieren muß, um die Leistung des Wechselstromes $A = e_{\text{eff}} \cdot i_{\text{eff}} \cdot \cos \varphi$ zu erhalten, den Leistungsfaktor oder Arbeitsfaktor. Bei in der Praxis vorkommenden Wechselstrommagneten kann daher von einer

Phasenverzögerung φ des Stromes gegen die Spannung nur in dem Sinne gesprochen werden, daß $\cos \varphi$ der Faktor ist, mit dem man das Produkt aus effektiver Spannung und effektivem Strome multiplizieren muß, um die Arbeitsleistung A des Wechselstromes zu erhalten.

6. Wechselstromelektromagnete für Messinstrumente.

Zur Messung von Stromstärken und Spannungen sind Elektrodynamometer und Hitzdrahtinstrumente wohl geeignet, Apparate jedoch, die auf der Anziehung von stromdurchflossenen Spulen auf Eisenteile beruhen, sind nur in besonderen Fällen anwendbar.

Die Anziehungskraft Z einer von einem Gleichstrom durchflossenen Spule ist $Z = \mathfrak{K} \cdot J \cdot \mathfrak{B}$ 18) wenn \mathfrak{K} eine Konstante, J die Stromstärke und \mathfrak{B} die magnetische Induktion im Eisen ist.

Bei Wechselstrom ändert sich J und \mathfrak{B} während einer Periode. Betrachten wir den Verlauf der drei Größen Z, J, \mathfrak{B} während einer vollen Periode (vergl. Fig. 75). Wir zerlegen zu diesem Zwecke die Hysteresiskurve in sechs Abschnitte I, II, III, IV, V, VI.

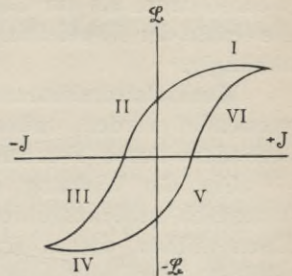


Fig. 75. Hysteresiskurve als Funktion der Stärke des magnetisierenden Stromes.

- | | | | | |
|---------------|---|----------------------|---------------------------|-------------------------|
| Im Abschnitte | I | ist J_t positiv, | \mathfrak{B}_t positiv, | folglich Z_t positiv, |
| » | » | II » J_t negativ, | \mathfrak{B}_t positiv, | » Z_t negativ, |
| » | » | III » J_t negativ, | \mathfrak{B}_t negativ, | » Z_t positiv, |
| » | » | IV » J_t negativ, | \mathfrak{B}_t negativ, | » Z_t positiv, |
| » | » | V » J_t positiv, | \mathfrak{B}_t negativ, | » Z_t negativ, |
| » | » | VI » J_t positiv, | \mathfrak{B}_t positiv, | » Z_t positiv. |

Während der Abschnitte I, III, IV, VI wird somit das Eisen von der Spule angezogen, während der Abschnitte II und V aber abgestoßen. Dem absoluten Werte nach überwiegen weitaus die positiven Werte. Ein von einem Wechselstrom durchflossenes Solenoid übt somit auf einen darin befindlichen Eisenkörper eine Anziehungskraft aus; diese Anziehungskraft ist aber kleiner als die, welche ein Gleichstrom von gleicher Stärke ausübt.

Ein auf magnetischer Anziehung beruhendes Instrument würde richtig zeigen, wenn sich \mathfrak{B}_t proportional J_t änderte, d. h. wenn die Hysteresiskurve eine durch den Nullpunkt hindurchgehende Gerade wäre.

Auch dann aber würde die Angabe das Instrument nicht dem in der Praxis allgemein verwendeten quadratischen Mittelwerte

$J_{\text{eff}} = \sqrt{M(J_t^2)}$, sondern dem gewöhnlichen Mittelwerte $\sqrt{M(J)}$ proportional sein.

Nun ist (vergl. Kap. 1, 8., S. 13):

$$\sqrt{M(J_t^2)} = \frac{M(J_t)}{c};$$

c aber ist der Formfaktor und von der Gestalt der Wechselstromkurve abhängig.

Ein magnetisches Meßinstrument zeigt somit kleinere Werte für Wechselstrom als für Gleichstrom bei gleicher effektiver Stärke, und die Größe der Abweichung ist von der Gestalt der Wechselstromkurve abhängig.

Wechselstrominstrumente, bei welchen magnetische Anziehungen verwendet werden, müssen somit für jede Art des Wechselstromes besonders durch Versuche geächtet werden.

Um die Wirkung der Hysteresis, worauf die Abweichungen wesentlich zurückzuführen sind, möglichst abzuschwächen, muß man Eisen wählen, dessen Hysteresisschleife möglichst wenig Fläche einschließt, man muß also magnetisch weiches Eisen verwenden, man muß ferner das Eisen möglichst stark magnetisieren, weil für hohe Werte von \mathfrak{B} die beiden Kurvenäste, der aufsteigende und absteigende Teil einander verhältnismäßig näher liegen, und man muß endlich dem Eisen ein möglichst kleines Volumen geben, damit schon bei kleinen Stromstärken das Eisen möglichst nahe der Sättigung magnetisiert ist.

Wenn man Wechselspannungen mit magnetischen Meßinstrumenten mißt, muß man ferner noch berücksichtigen, daß sich dem Wechselstrom nicht der einfache Ohmsche Widerstand W der Spule, sondern der scheinbare Widerstand $W' = \sqrt{W^2 + \omega^2 Q^2}$ entgegengesetzt. Das für Gleichstrom geächtete Voltmeter muß daher, auch wenn der Vorschaltwiderstand induktionsfrei (bifilar gewickelt) ist, für Wechselstrom die Spannungen zu niedrig zeigen, weil die zahlreichen Windungen der Spannungsspule eine merkliche Selbstinduktion Q zeigen.

Es geht aus diesen Betrachtungen hervor, daß Meßinstrumente, deren Angaben auf magnetischen Anziehungen beruhen, nur dann für Wechselstrommessungen verwendet werden dürfen, wenn sie für die besondere Form des Wechselstromes, der gemessen werden soll, und für die Periodenzahl nach Hitzdrahtinstrumenten vorher geächtet worden sind.

Die Hitzdrahtinstrumente können zuvor auf chemischem Wege mit Gleichstrom geächtet werden.

9. Kapitel.

Besondere Induktionswirkungen der Wechselströme.

1. Wirbelströme.

Schwingt zwischen den Polen eines Elektromagneten eine Kupferscheibe, so werden, sowie man den Strom schließt, in der Kupferscheibe Induktionsströme hervorgerufen, die nach dem Lenzschen Gesetze (vergl. Gleichstromtechnik, Kap. VIII, 2., S. 166) infolge der Wechselwirkung zwischen induziertem Strom und Magnet die Bewegung zu hemmen suchen. Infolge dieser Ströme, Wirbelströme genannt, kommt die schwingende Scheibe fast sofort zur Ruhe.

Wenn man einen Magneten in der unmittelbaren Nähe massiver Kupfermassen schwingen läßt, so induziert der Magnet in dem benachbarten Kupfer Ströme, die durch ihre Rückwirkung auf den Magneten dessen Bewegungen stark dämpfen und die Schwingungen rasch zur Ruhe bringen. — Bekanntlich macht man von diesen dämpfenden Wirkungen vielfach bei Meßinstrumenten Anwendung.

In jeder Metallmasse eines Wechselstromapparates entstehen und verschwinden ebenfalls, der Periode der Wechselströme folgend, Kraftlinien. Jede Änderung der Kraftlinienzahl aber ruft in benachbarten Leitern Induktionsströme hervor.

Da für eine gegebene magnetomotorische Kraft im Eisen besonders viele Kraftlinien erzeugt werden, müssen diese induzierenden Wirkungen sich hauptsächlich in Eisenteilen geltend machen, in deren Nähe Wechselströme fließen, und ganz besonders stark müssen solche Induktionsströme in den Kernen der Elektromagneten auftreten, durch deren Spulen ein Wechselstrom fließt.

Diese Ströme werden in zusammenhängenden Eisenmassen außerordentliche Stärken erreichen können, weil der Ohmsche Leitungswiderstand solcher zusammenhängender Metallmassen sehr gering ist.

Diese Wirbelströme erzeugen in den Körpern, in denen sie fließen, Stromwärme, natürlich auf Kosten der Energie des Wechselstromes, dem sie ihre Entstehung verdanken. Wenn der Wechselstrom aber nach Einschaltung einer Strombahn, die in benachbarten Metallteilen

Wirbelströme erzeugt, dieselben sonstigen Wirkungen, wie vorher, hervorbringen soll, muß er verstärkt werden. Auch die Phasenverschiebung zwischen Stromstärke und Spannung des Wechselstromes wird durch die Rückwirkung der Wirbelströme auf den sie erzeugenden Strom verkleinert.

Will man also beträchtliche Energieverluste und schädliche Wärmeentwickelungen vermeiden, so muß man die Entstehung von Wirbelströmen soweit als irgend möglich vermeiden. Es müssen daher Metallmassen, in deren unmittelbarer Nähe Wechselströme verlaufen, aus einzelnen voneinander isolierten Teilen zusammengesetzt werden.

Die Eisenkerne der Wechselstrommagneten im besonderen müssen derart aus Blechen oder Drähten aufgebaut werden, daß die magnetischen Kraftlinien in ihnen ungehindert verlaufen können, während der Entstehung von Wirbelströmen vorgebeugt wird. Es geschieht dies zumeist in der Weise, daß man die Eisenkörper aus Blechen bildet, deren Längsrichtung mit der Richtung der Kraftlinien zusammenfällt, während man in der dazu senkrechten Richtung die Bleche durch Zwischenlagen von dünnem Papier oder durch Lack voneinander isoliert.

Um in dicken Kupferleitungen der Entstehung von Wirbelströmen vorzubeugen, setzt man dieselben aus mehreren voneinander isolierten Adern zusammen. Schon ein Lacküberzug eine Oxydschicht genügt zumeist, um die Wirbelströme auf eine so geringe Stärke herabzumindern, daß ihre Wirkung in der Praxis vernachlässigt werden kann.

Die Stromstärke der Wirbelströme ist, wie sich aus den Induktionsgesetzen ergibt, der Wechselzahl und einem Koeffizienten proportional, von dem die wechselseitige Induktion der in Betracht kommenden Leiterteile abhängt.

Nach Formel 13 (S. 29) ist nämlich:

$$E_{\text{eff}} = \frac{4,44 \sim Q \mathfrak{B}_{\text{max}} \cdot n}{c} \cdot 10^{-8} \text{ Volt} \quad \quad 1)$$

Da hier keine Windungen vorkommen, ist $n = 1$. Die in einem benachbarten Eisenleiter induzierte EMK ist somit:

$$e = \frac{4,44 \sim Q \mathfrak{B}_{\text{max}}}{c} \quad \quad 2)$$

wenn man nicht in Volt, sondern in absoluten Einheiten rechnet.

Der Energieverlust durch Stromwärme in einem Wirbelstromfaden ist hiernach:

$$i^2 \cdot w = \frac{e^2}{w} = \frac{19,7 \sim^2 Q^2 \cdot \mathfrak{B}_{\text{max}}^2}{c^2 \cdot w} \quad \quad 3)$$

wenn w der Widerstand der Strombahn des Wirbelstromfadens ist.

Die durch die Wirbelströme entwickelte Stromwärme ist dem Quadrate der Stromstärke proportional; hiernach ist die von den

Wirbelströmen entwickelte Wärmemenge dem Quadrate der Anzahl der Perioden des Wechselstromes proportional und abhängig von der Unterteilung des Materiales.

B_{\max} und c sind gegebene Werte. Wählen kann man jedoch $\frac{Q^2}{w}$. Dadurch, daß man $\frac{Q^2}{w}$ möglichst klein macht, d. h. durch Unterteilung des Materiales in isolierte Streifen, kann man auch die durch Wirbelströme als Wärme vergeudete Energiemenge so klein machen wie man will, und wie dies sonstige praktische Gründe ratsam erscheinen lassen.

Nehmen wir z. B. an, wir hätten einmal einen massiven Eisenkörper von der Länge a und der Dicke b , das andere Mal sei b in n isolierte Teile geteilt. Beide Eisenkörper, das eine Mal der massive und das andere Mal der aus n Blechen zusammengesetzte, befinden sich in derselben Spule und werden von demselben Wechselstrom

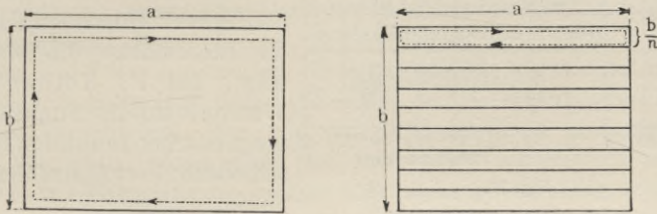


Fig. 76. Wirbelströme in ungeteiltem und in geteiltem Eisen.

umflossen. In Fig. 76 deutet die punktierte Linie den Weg des Wirbelstromfadens an.

Es ist nun (vergl. Gleichstromtechnik Kap. I, 9., S. 8, Gl. 3):

$$w = k \cdot \frac{1}{q} \dots \dots \dots 4)$$

somit

$$\frac{Q^2}{w} = \frac{Q^2 \cdot q}{1 \cdot k} \dots \dots \dots 5)$$

Es ist nun beim ungeteilten Eisenkörper:

$$\frac{Q^2}{1} = \frac{a^2 \cdot b^2}{2(a + b)} \dots \dots \dots 6)$$

bei dem aus n Blechen bestehenden Eisenkörper:

$$\frac{Q^2}{1} = n \frac{\left(a \cdot \frac{b}{n}\right)^2}{2\left(a + \frac{b}{n}\right)} = n \frac{a^2 b^2}{2n(a + \frac{b}{n})} = \frac{a^2 b^2}{2(a + \frac{b}{n})} \dots \dots 7)$$

Man erkennt, daß $\frac{Q^2}{1}$ umso kleiner wird, je größer die Anzahl n ist

Man benutzt für die Kerne von Elektromagneten, deren Windungen von Wechselströmen durchflossen sind, daher meist voneinander isolierte Bleche von 0,33 bis höchstens 0,5 mm Dicke.

Für 1 *ccm* weiches Eisen, das aus voneinander isolierten Blechen von 0,5 mm Dicke zusammengesetzt ist, beträgt nach Ewing der Arbeitsverlust durch Wirbelströme A_W

$A_W = 0,004 \cdot \omega^2 \cdot \mathfrak{B}_{\max}^2 \cdot 10^{-8}$ (Formel 8) wenn A_W in Watt und \mathfrak{B}_{\max} in absoluten Einheiten ausgedrückt wird.

Für den in der Praxis sehr häufig vorkommenden Fall, daß die Blechstärke 0,5 mm beträgt, hat E. Kolben¹⁾ die Wattverluste als Funktion der magnetischen Induktion für verschiedene Periodenzahlen graphisch dargestellt.

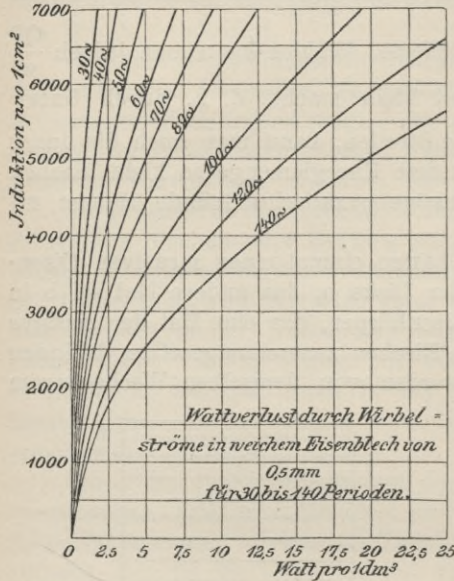


Fig. 77.

In Fig. 77 ist dieses Diagramm Kolbens reproduziert. Für praktische Zwecke ist es zweckmäßig gleich den gesamten Verlust,

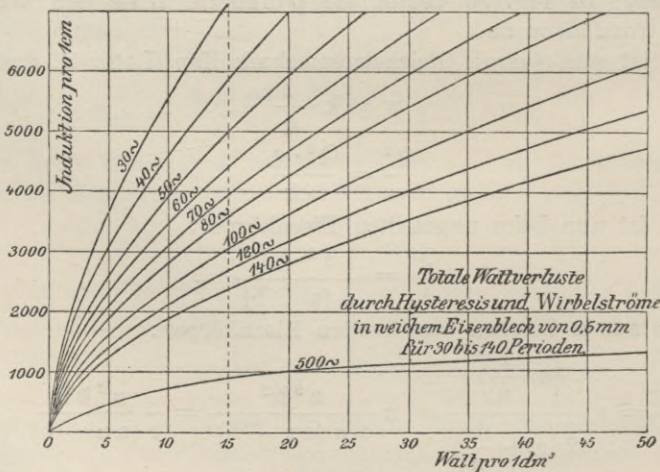


Fig. 78.

¹⁾ E. T. Z. 1894, S. 77.

der im Eisen von Wechselstromapparaten durch Hysteresis und durch Wirbelströme entsteht, zusammenzufassen. Der Gesamtverlust im Eisenvolumen ist:

$$A_H + A_W = V \cdot (\eta \cdot \sim \mathfrak{B}_{\max}^{1,6} + \xi \sim \mathfrak{B}_{\max}^2) \cdot 10^{-7} \text{ Watt} \quad . \quad 9)$$

V ist das Volumen des Eisens in dm^3 und $\xi = \frac{\delta^2}{c^2 \cdot k} \cdot 10^{-7}$;

worin δ die Blechdicke in mm , c der Formfaktor der Wechselstromkurve und k der spezifische Leitungswiderstand des Eisens ist. Es ist näherungsweise $\eta = 0,0018$ und $\xi = 20 \cdot \delta^2 \cdot 10^{-7}$.

Für Eisenblech von $0,5 \text{ mm}$ Dicke stellt nach Kolben das Diagramm, Fig. 78, den Gesamtverlust im Eisen in seiner Abhängigkeit von \mathfrak{B}_{\max} dar.

2. Einfluss der Wirbelströme auf die Magnetisierung.

Die Wirbelströme wirken auch ungünstig auf die Magnetisierung des Eisens zurück, ein Grund mehr, das Eisen in einer zum Verlaufe der Kraftlinien senkrechten Richtung möglichst sorgfältig zu blättern, d. h. möglichst dünne Bleche zu verwenden.

Die EMK der induzierten Wirbelströme ist, wie wir schon vorher zeigten, um nahe 180° gegen die EMK des sie erzeugenden Wechselstromes verschieden. Die von den Wirbelströmen erzeugten Kraftlinien vernichten somit einen Teil der vom Wechselstrom erzeugten Linien. Die Wirbelströme wirken aber nicht gleichmäßig schwächend auf der ganzen Dicke des Eisenbleches, sondern sie schwächen vorzugsweise die im Innern des Eisens verlaufenden Kraftlinien, weil auf diese alle Wirbelströme einwirken, während auf die an der Oberfläche gelegenen nur ein Teil der Wirbelströme einwirkt.

Durch die Wirbelströme wird also eine ungleichmäßige Verteilung der Kraftlinien im Eisenblech hervorgerufen, die Linien drängen sich an der Oberfläche zusammen, dort ist ihre Dichte größer, in der Mitte fließen wenig oder bei dicken Blechen gar keine der vom Wechselstrom erzeugten Kraftlinien.

Der Querschnitt des Kraftlinienstromes wird daher scheinbar verkleinert, die mittlere Dichte desselben vergrößert, es bedarf also zur Erzeugung derselben Zahl von Kraftlinien einer stärkeren magnetomotorischen Kraft, d. h. einer größeren Zahl von Ampèrewindungen, wenn merkliche Wirbelströme vorhanden sind. Die wirksame Plattendicke, d. h. die Plattendicke, die bei gleichförmig dichter Magnetisierung dieselbe Linienzahl führen würde, beträgt nach Ewing¹⁾ für 50 Perioden in 1 Sekunde:

bei ∞	dicker Platte:	$2 \times 0,252 \text{ mm}$
» 2	»	$2 \times 0,250 \text{ »}$
» 1,5	»	$2 \times 0,256 \text{ »}$

¹⁾ E. T. Z. 1892, S. 392.

bei 1,0 mm dicker Platte:	$2 \times 0,282$ mm
» 0,75 » » »	$2 \times 0,285$ »
» 0,5 » » »	$2 \times 0,233$ »
» 0,25 » » »	$2 \times 0,124$ »

Man sieht, daß bei $\frac{1}{4}$ mm dicken Eisenplatten die Schirmwirkung der Wechselströme vernachlässigt werden kann, und daß sie schon bei 0,5 mm dicken Eisenblechen sehr gering ist.

Da nun die Herstellung eines Eisenkörpers um so kostspieliger wird, je dünner die dazu verwendeten Eisenbleche sind, und die Raumausnutzung wegen der isolierenden Zwischenschichten sich umso ungünstiger gestaltet, so werden in der Praxis zum Aufbau der Kerne der Wechselstromapparate meist weiche Eisenbleche von 0,33 bis 0,5 mm, nur selten noch dünnere Bleche verwendet.

3. Ungleichförmige Verteilung eines Wechselstromes in einem massiven Leiter. Skineffekt.

Wir müssen an dieser Stelle auch den Umstand erwähnen, daß in stärkeren Leitern die Verteilung des Stromes auf den Querschnitt nicht gleichförmig wie bei Gleichstrom stattfindet, sondern daß die mehr nach dem Umfange zu gelegenen Schichten stärker belastet sind als die inneren Teile des Querschnittes.

Man nennt diese Erscheinung das Kelvin'sche Phänomen oder den Skineffekt.¹⁾

Denken wir uns aus dem Längsschnitt eines dicken Wechselstromleiters seitlich im Abstände x ein Rechteck $a b c d$ herausgeschnitten (Fig. 79), dessen Seiten parallel beziehentlich senkrecht zur Achse OO des Leiters sind.

Der in der Richtung des Pfeiles fließende Strom erzeugt nicht nur außerhalb des Leiters, sondern auch im Innern desselben Kraftlinien; diese Kraftlinien sind Kreise, deren Zentren in OO liegen und deren Ebenen senkrecht zu OO stehen. Im vorliegenden Falle kommen diese Kraftlinien von hinten nach vorn durch die Zeichenebene.

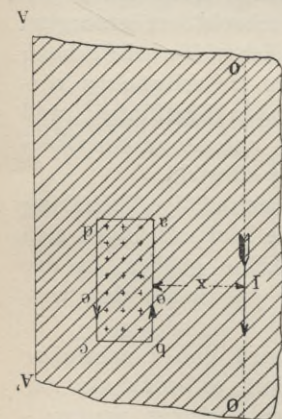


Fig. 79. Induktion in dicken, von Wechselstrom durchflossenen Leitern.

Sei Φ der magnetische Fluß, der durch $a b c d$ hindurchgeht. Ändert sich nun die momentane Stromstärke i , so ändert sich auch die Zahl der durch das Rechteck hindurchgehenden Kraftlinien. Das Rechteck wird wegen der Änderung der Kraftlinienzahl der Sitz einer

¹⁾ skin (englisch), Haut.

EMK. Bei wachsendem i hat diese EMK die Richtung der in Fig. 79 gezeichneten Pfeile, bei abnehmendem i entgegengesetzte Richtung.

Im Innern des Leiters treten somit induzierte Ströme auf, die zu dem Hauptstrom hinzukommen und sich zu diesem algebraisch addieren.

Bei einer gleichmäßigen Verteilung des Stromes im ganzen Querschnitte wäre die Spannungsdifferenz zwischen den Punkten a und b gleich der zwischen d und c . Wir stellen dieselbe dar (Fig. 80) durch einen Vektor OE , der sich in Phasenvoreilung zum Strome OJ befinden möge. (Drehrichtung mit dem Uhrzeiger.)

Hierzu tritt nun die EMK der Strominduktion auf das Viereck $a b c d$, die gegen die Stromstärke um 90° in der Phase verschieden ist und für $a b$ durch $O\mathcal{E}$, für $c d$ durch das gleichgroße, aber entgegengesetzt gerichtete $O\mathcal{E}'$ dargestellt werden möge.

Die Spannungsdifferenz zwischen a und b wird nunmehr durch den resultierenden Vektor OE_2 und die zwischen c und d durch OE_1' dargestellt. Es ist

$$OE_2 > OE > OE_1',$$

weil der Winkel $\mathcal{E}OE$ wegen der Phasenverschiebung von J gegen E spitz ist.

Es nimmt somit die Spannungsdifferenz auf gleiche Leiterlänge ab. Diese Differenz wächst von der Achse des Leiters nach seiner Oberfläche hin. Mit der Spannungsdifferenz ändert sich aber in gleicher Weise auch die durch diese Spannungsdifferenz verursachte Stromstärke.

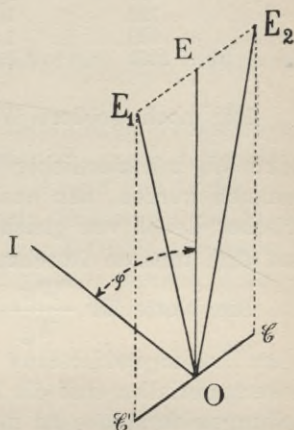


Fig. 80. Diagramm des Skin-Effekts.

Lord Kelvin (Sir William Thomson) hat die Frage eingehend rechnerisch untersucht. Er findet, daß die Stromdichte in den an der Oberfläche gelegenen Schichten viel größer ausfällt als in der Nähe der Achse, und daß diese Wirkung mit der Dicke des Leiters und mit der Wechselzahl des Stromes wächst, außerdem aber auch von der magnetischen Permeabilität der Substanz des Leiters abhängig ist.

Nennt man

$$W_g = \frac{4 k \cdot l}{d^2 \cdot \pi}$$

den Widerstand des Leiters gegen Gleichstrom (k der spezifische Leitungswiderstand, l die Länge des Leiters, d der Durchmesser des kreisförmigen Leiters) und bezeichnet mit W_w den Widerstand desselben Leiters gegen Wechselstrom, so ist:

$$\frac{W_w}{W_g} = 1 + \frac{1}{12} \frac{l^2 \cdot \omega^2}{W_g^2} - \frac{1}{180} \frac{l^4 \cdot \omega^4}{W_g^4} + \dots \dots \dots 10)$$

Für verschiedene Werte von $\frac{d^2}{T}$ (wobei $T = \frac{1}{\omega} = \frac{2\pi}{\omega}$) hat Poitier nachstehende Tabelle berechnet.

$\frac{d^2}{T}$	$\frac{W_w}{W_g}$	$\frac{d^2}{T}$	$\frac{W_w}{W_g}$
0	1,0000	1620	1,8628
20	1,0000	2000	2,0430
80	1,0001	2420	2,2190
180	1,0258	2880	2,3937
320	1,0805	5120	3,0956
500	1,1747	8000	3,7940
720	1,3180	18000	5,5732
980	1,4920	32000	7,3250
1280	1,6778		

Für noch größere Werte von $\frac{d^2}{T}$ als 32000 kann der Widerstand W_w mit ziemlicher Annäherung gleich dem Widerstand angenommen werden, den nach dem Ohmschen Gesetze ein hohler zylindrischer Leiter von gleicher Länge mit dem äußeren Durchmesser d und dem inneren Durchmesser von $6,38 \sqrt{T} \text{ cm}$ besitzt.

Die Werte für $\frac{W_w}{W_g}$ beziehen sich auf Kupfer mit dem spezifischen Leitungswiderstand $k = 0,016$. Für andere nichtmagnetische Leitermaterialien sind die Zahlen mit dem Quotienten der spezifischen Leitungswiderstände zu multiplizieren. Für magnetische Leitermaterialien treten andere Verhältnisse auf, da dann die magnetische Permeabilität der Substanz eine große Rolle spielt.

Bei sehr hohen Frequenzen veranlassen dicke Leiter nicht nur einen induktiven Widerstand, sondern auch eine Erhöhung des Ohmschen Widerstandes. In Leitern von großen Querschnitten ist übrigens nicht nur die Stromdichte innen geringer als außen, sondern der Strom im Innern bleibt infolge der stärker wirkenden Selbstinduktion auch mehr in der Phase hinter der Spannung zurück als in den oberflächlichen Schichten.

Wenn man will, daß die Stromdichte in der Achse eines kupfernen Leiters um nicht mehr als 5% hinter der an der Oberfläche zurückstehen soll, dürfen nach obigen Formeln folgende Grenzen nicht überschritten werden:

Wechselzahl \sim	125	100	60	33,3
Dicke . . D	1,08 cm	1,21 cm	1,56 cm	2,1 cm.

Man erkennt aus dem Vorstehenden, daß für die elektrotechnische Praxis, in der \sim meist gleich 50, selten wesentlich höher, höchstens $\sim = 100$ ist, der Skineffekt einfach vernachlässigt werden kann.

Aus diesen Betrachtungen ergibt sich, daß man für die Fortleitung von Wechselströmen mit hoher Periodenzahl anstatt massiver Kupferzylinder besser Hohlzylinder oder Kupferbänder verwenden wird.

Da Blitzschläge wahrscheinlich auch nur sehr kurze Zeit dauernde Ströme oder Wechselströme von kurzer Dauer sind, wird man mit Rücksicht auf diese Erscheinungen auch für Blitzableiter besser breite Kupferbänder oder Seile wählen, als Drähte, und im allgemeinen dem Kupfer vor dem Eisen den Vorzug geben müssen. Für dünnere Bänder kommt jedoch der Skineffekt nicht in Betracht, und deshalb sind Blitzableiter aus dem schwerer als Kupfer schmelzbaren Band-eisen durchaus nicht zu verwerfen.

4. Abstossende Wirkungen des induzierenden auf den induzierten Wechselstrom.

Stellt man übereinander zwei sinoidal verlaufende Wechselströme dar, von welchen der eine um eine Viertelperiode gegen den anderen verschoben ist (vgl. Fig. 81a), so haben während der Dauer einer Viertelperiode beide Ströme entgegengesetzte Richtung, die Leiter, welche diese Ströme führen, werden daher (vergl. Gleichstromtechnik, Kap. VII, 1., S. 157) eine abstoßende elektrodynamische Wirkung aufeinander ausüben. Während der nächsten Viertelperiode sind

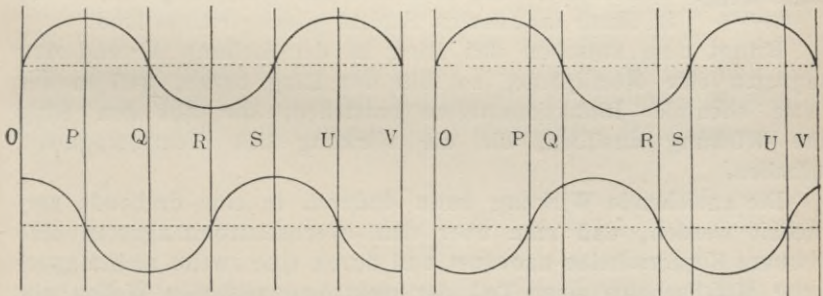


Fig. 81 a.

Fig. 81 b.

Anziehende und abstoßende Wirkung zwischen zwei Wechselströmen.

dagegen beide Ströme gleichgerichtet, und es findet eine elektrodynamische Anziehung statt. In der nächsten Viertelperiode erfolgt Abstoßung, in der weiteren Anziehung u. s. f. Da abstoßende und anziehende Wirkungen gleich stark sind, wird eine Neigung zur Verschiebung des einen Leiters gegen den anderen nicht eintreten.

Läßt man nun einen Wechselstrom in einem benachbarten Leiter einen zweiten Wechselstrom induzieren, so ist für gewöhnlich, infolge

der Selbstinduktion des induzierten Leiters, die Periode des induzierten Stromes um etwas mehr als 90° gegen den induzierenden verschoben. Infolgedessen sind nun aber die abstoßenden und anziehenden Wirkungen nicht mehr gleich.

Abstoßung findet in Fig. 81b zwischen den Linien O und P und zwischen Q und R, Anziehung nur auf der kurzen zwischenliegenden Strecke PQ und RS statt. Während der Abschnitte, in denen die Ströme entgegengesetzt gerichtet sind, ist außerdem der Durchschnittswert beider Stromstärken viel größer als während der Zeitabschnitte, in welchen Anziehung stattfindet.

In einem solchen Falle wird somit die abstoßende Wirkung die anziehende überwiegen, und diese Wirkung wird um so größer sein, je größer die Selbstinduktion des Stromkreises ist, in welchem der Wechselstrom induziert ist.



Fig. 82. Abstoßung eines Ringes durch einen Wechselstrommagneten.

Elihu Thomson hat auf diese Betrachtungen eine Reihe sehr interessanter Experimente gegründet.

Wenn man z. B. über einen Wechselstrommagneten einen metallischen Ring A schiebt, so wird der Ring abgestoßen. Je nach der Stromstärke wird entweder der Ring fortgeschleudert oder er bleibt in einer gewissen Stellung A' über dem Elektromagneten frei schweben. (Fig. 82.)

Bringt man einen zweiten Ring schwebend über dem anderen an, so ziehen sich beide Ringe an, da die in ihnen induzierten Ströme gleichgerichtet sind.

Bringt man zwischen den Ring in der Stellung A' und den Magneten eine Metallplatte, so fällt der Ring herab, weil in der Platte ebenfalls Induktionsströme entstehen, die auf den Ring eine Wirkung ausüben, die die Wirkung des Elektromagneten aufheben.

Die anziehende Wirkung kann dadurch in eine drehende verwandelt werden, daß man über dem Wechselstrommagneten eine drehbare Kupferscheibe anordnet und durch eine zweite nichtmagnetische Metallscheibe einen Teil der elektromagnetischen Wellen abdämpft. Die in den Scheiben induzierten Ströme werden dadurch seitlich verschoben, und die bewegliche Scheibe beginnt sich zu drehen. Diese Erscheinung hat bei Wechselstrommeßinstrumenten und Wechselstrombogenlampen mehrfach Anwendung gefunden.

Schiebt man endlich über den Eisenkern des Magneten eine kurzgeschlossene Drahtspule, so sind die in der Spule erzeugten Ströme so stark, daß sie hinter der Spule die elektromagnetischen Wellen abdrosseln. An dem Teile des Eisenkernes zwischen Magnetspule und übergeschobener Spule wird weiches Eisen angezogen,

während hinter der Spule eine magnetische Anziehung nicht wahrnehmbar ist.

Bei den Wechselstrombogenlampen von Körting & Mathiesen wird die induktive Abstoßung eines Ringes, der sich vor den Polen eines Wechselstromelektromagneten befindet, zum Bilden des Lichtbogens durch Verschieben des Ringes infolge der Abstoßung verwendet.

An einer Wechselstromlampenkonstruktion, System Utzinger, der Firma Schuckert & Co. in Nürnberg erfolgt die Regulierung der Bogenlampe durch Drehung einer Scheibe, die durch Wirbelströme, welche ein benachbarter Wechselstromelektromagnet in der Scheibe hervorruft, in Bewegung gesetzt wird. Der vom Wechselstrom umflossene Elektromagnet besitzt einen seitlich verlängerten Polschuh (L in Fig. 83). In diesem Polschuh und in der davor befindlichen Scheibe entstehen Wechselströme, die eine Drehung der Scheibe veranlassen. Je nach-

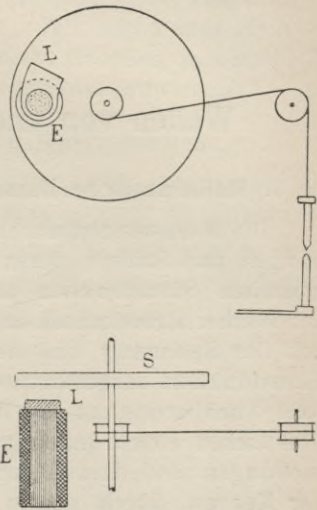


Fig. 83. Regulierung der Wechselstrombogenlampe, System Utzinger.

dem man die Wickelung des Elektromagneten vom Hauptstrom durchfließen läßt oder sie zum Lichtbogen parallel schaltet (vergl. Gleichstromtechnik, Kap. III, 8., S. 61), oder je nachdem man zwei Elektromagneten auf die Scheibe wirken läßt, von welchen der eine vom Hauptstrom durchflossen, der andere im Nebenschluß liegt, kann man diesen Gedanken zur Konstruktion von Hauptstrom-, Nebenschluß- oder Differentiallampen für Wechselstrom benutzen.

10. Kapitel.

Wellen von anderer als sinusdaler Form.

1. Mathematische Darstellung einer beliebigen Wellenform.

Die Wechselstrommaschinen liefern in Wirklichkeit zumeist Spannungen und Ströme, deren Verlauf nicht unerheblich von dem einer einfachen Sinusfunktion abweicht. Die Behandlung der Aufgaben der Wechselstromtechnik unter der Voraussetzung, daß die Abhängigkeit der Spannung und der Stromstärke von der Zeit durch eine Sinusfunktion dargestellt werden können, ist daher nur eine ziemlich rohe Annäherung an die Wahrheit, und gewisse Abweichungen der praktischen Erfahrungen von den Ergebnissen theoretischer Untersuchungen sind darauf zurückzuführen, daß man die wahre Gestalt der Kurven, durch welche der zeitliche Verlauf der Spannung und Stromstärke dargestellt wird, nicht berücksichtigt hat. Wir messen und rechnen stets mit effektiven Werten, d. h. mit quadratischen Mittelwerten, und berücksichtigen dabei nicht, daß die Maximalwerte sich unter besonders ungünstigen Umständen um das Mehrfache über diese Mittelwerte erheben.

Fourier hat nun nachgewiesen, daß jede beliebige periodische Kurve, auch jede zickzackförmig gebrochene Linie, durch Zusammensetzung einer Anzahl einfacher Sinusfunktionen verschiedener Maximalwerte (Amplituden) dargestellt werden kann, die als Argumente Vielfache des Argumentes der Grundfunktion enthalten.

Der Momentanwert Y_t jeder beliebig gestalteten, sich periodisch kongruent wiederholenden Wellenlinie kann mathematisch dargestellt werden durch eine sogenannte Fouriersche Reihe, d. h. durch einen Ausdruck von folgender Form:

$$Y_t = a_1 \cdot \sin(\omega t + a_1) + a_2 \sin(2\omega t + a_2) + a_3 \sin(3\omega t + a_3) + a_4 \sin(4\omega t + a_4) + a_5 \sin(5\omega t + a_5) + \dots \quad 1)$$

Die Größen a_1, a_2, a_3, \dots , sowie die Werte a_1, a_2, a_3, \dots sind konstante Werte.

Wenn man die Sinus der Summen der Argumente auflöst, nimmt die Fouriersche Reihe die Form an:

$$Y_t = c_1 \cdot \cos \omega t + d_1 \sin \omega t + c_2 \cdot \cos 2\omega t + d_2 \sin 2\omega t + c_3 \cdot \cos 3\omega t + d_3 \cdot \sin 3\omega t + \dots \quad 2)$$

Es liegt in der Wechselstromtechnik genau derselbe Fall vor, wie in der Akustik, in welcher mathematisch und experimentell gezeigt wird, daß die eigenartige Klangfarbe eines bestimmten Tones, die durch eine gewisse eigentümliche Wellenform dieses Tones charakterisiert wird, sich darauf zurückführen läßt, daß neben dem Haupt- oder Grundtone noch verschiedene harmonische Obertöne in verschiedener Intensität gleichzeitig neben dem Grundtone mitwirken.

2. Die in der Praxis auftretenden Kurvenformen.

In der elektrotechnischen Praxis hat sich nun herausgestellt, daß es bei Maschinen mit Wechselepolen vorzugsweise die ungeradzahigen, elektrischen Obertöne, die höheren Harmonischen von drei-, fünf-, siebenfacher Frequenz sind, durch deren Mitwirkung

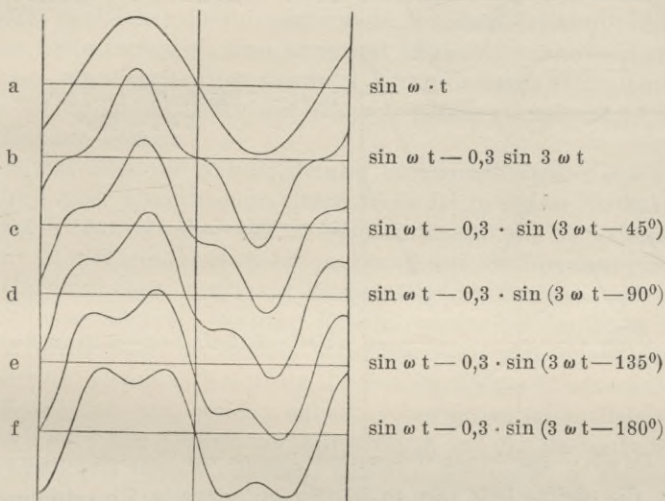


Fig. 84. Veränderung der Wellenform durch Hinzutritt einer Welle von dreifacher Periode.

die eigentümliche Gestalt der Wechselstrom- und Wechselspannungskurven bedingt wird. Die meisten Kurvenformen, die in der Wechselstromtechnik Bedeutung haben, lassen sich durch Ausdrücke darstellen, die der Form:

$$Y_t = a_1 \cdot \sin(\omega t + a_1) + a_3 \cdot \sin(3 \omega t + a_3) + a_5 \cdot \sin(5 \omega t + a_5) \cdot 3)$$
 entsprechen. Die Größen a_3 , a_5 sind dabei meist nur Bruchteile der Größe a_1 , des Maximalwertes der Hauptschwingung oder des Grundtones. Dieser vereinfachten Formel 3) entsprechen alle Kurven, deren Hälften in bezug auf die mittlere Ordinate symmetrisch sind. Bei den Maschinen mit Folgepolen kommen dagegen die geradzahigen höheren Harmonischen in Betracht.

In der umstehenden Fig. 84 sind z. B. die Gestaltsänderungen zu sehen, die je nach der Phasendifferenz α_3 das Hinzutreten einer Welle von dreifacher Frequenz mit einem Maximalwerte von $\frac{3}{10}$ Größe auf die Form der Welle ausübt. Man sieht, daß je nach dem Werte von α_3 sowohl eine zugespitzte Form (b), als eine abgeflachte und eingesattelte Form (f) herauskommen kann.

In Fig. 85 sind einige der häufigst vorkommenden Gestalten von Wechselstromkurven abgebildet; daneben ist angegeben, durch welche Glieder einer Fourierschen Reihe dieselben dargestellt werden.

Die erste dieser Kurven hat eine abgeflachte Spitze und flache Durchgänge durch die Nullage; die zweite zeigt fast genaue Trapez-

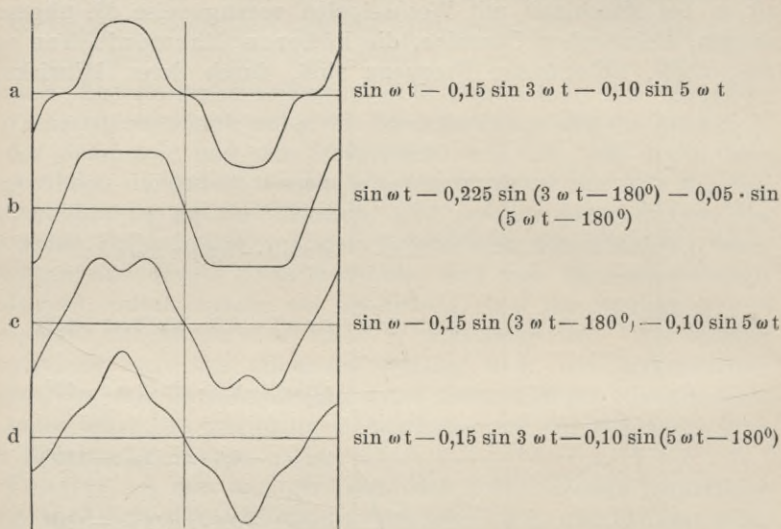


Fig. 85. Einige häufig vorkommende Formen von Wechselstromkurven.

form; die dritte läßt die so häufig auftretende Einsattelung in der Mitte erkennen, und die letzte endlich ähnelt der Zickzackform (man vergl. Kap. 1, 8., S. 14).

Durch Vergleich beobachteter Kurven mit diesen Gestalten wird man oft in der Lage sein den mathematischen Ausdruck zu vermuten, durch den eine solche Form dargestellt werden kann.

3. Einfluss der Kurvenform auf die Wirkungen des Wechselstromes.

In einem Stromkreis, in dem überwiegend induktionsfreie Belastung vorhanden ist, in dem also Strom und Spannung nahezu in gleicher Phase sind, werden Strom- und Spannungskurven in der Gestalt sehr nahe übereinstimmen.

Hat jedoch die Belastung eines Wechselstromerzeugers starke Selbstinduktion, so verbraucht die Selbstinduktion, weil ihre Reaktanz der Frequenz proportional ist, mehr EMK, die von den Gliedern herührt, die $3 \omega t$ und $5 \omega t$ enthalten. In dem induktionsfreien Teile des Stromkreises ist dann die Wirkung der höheren Glieder abgeschwächt, und die Kurve nähert sich mehr der Sinuskurve. Experimentelle Bestimmungen des Koeffizienten der Selbstinduktion aus gemessenen Effektivwerten werden daher durch die Kurvenform nicht erheblich beeinflußt.

Wenn dagegen Kapazität und nichtinduktiver Widerstand in Hintereinanderschaltung in einem Stromkreise auftreten, so wird mehr EMK der niedrigsten Frequenz verbraucht, und der Einfluß der höheren Glieder wird schärfer zur Geltung kommen. Bei Bestimmung der Kapazität darf daher die Kurvenform nicht unberücksichtigt bleiben.

Treten Selbstinduktion und Kapazität in Hintereinanderschaltung auf, so kann eine starke Spannungserhöhung dadurch eintreten, daß für eines der höheren Glieder der Resonanzeffekt (vergl. Kap. 4, 2., S. 57) zustande kommt.

Der Effekt oder die Arbeitsleistung und somit auch die Wärmeentwicklung einer zusammengesetzten Welle ist in einem Stromkreise einfach gleich der Summe der Arbeitsleistungen der Einzelwellen. Der Strom einer Harmonischen ist in bezug auf die Spannungen der anderen Harmonischen wattlos. Maschinen, die Ströme mit stark ausgesprochenen höheren Gliedern liefern, geben bei derselben Zahl von Ampèrewindungen im Anker, derselben Zahl von Kraftlinien in jedem Pole und derselben Frequenz ein etwas größeres Güteverhältnis, als dies Maschinen tun, welche nahezu reine Sinuswellen liefern.

Vielfach wird der Einfluß der Kurvenform auf die Ausbeute überschätzt; man kann jedoch zugeben, daß für gewisse Fälle die Sinusform, für andere spitze Wellen, für andere Fälle flache Wellenformen zweckmäßig sind. Für Wechselstrombogenlicht geben z. B. (vergl. Kap. 7, 4, S. 89) abgeflachte Formen ähnlich Fig. 85b die vorteilhafteste Lichtausbeute für jedes aufgewendete Watt.

Für Elektromotorenbetrieb sind Kurven mit zugespitzten Gipfeln vorteilhafter. Jedenfalls ist unter sonst gleichen Verhältnissen diejenige Wechselstrommaschine die beste, welche eine möglichst der Sinoide nahekommende Spannungskurve besitzt; ihr Leistungsfaktor ist der beste, und man braucht, wenn Kapazitäten im Leitungsnetz vorhanden sind, keine Störungen durch Resonanzeffekte höherer Harmonischen zu befürchten.

4. Die Bestimmung der Gleichung der Wellenform.

Wenn nach den später in Kapitel 15 beschriebenen Methoden die Kurvenform des Wechselstromes oder der Wechselspannung auf-

genommen worden ist, tritt häufig der Wunsch hervor die Gleichung dieser Kurve aufstellen zu können. Es ist dies sowohl auf analytischem als auf graphischem Wege möglich.

Für die analytische Bestimmung geht man aus von der Formel 2):

$$Y_t = c_1 \cdot \cos \omega t + c_2 \cdot \cos 2 \omega t + c_3 \cdot \cos 3 \omega t + \dots + d_1 \cdot \sin \omega t + d_2 \cdot \sin 2 \omega t + d_3 \cdot \sin 3 \omega t + \dots$$

und bestimmt die Koeffizienten c_k und d_k derart, daß die Summe der Quadrate der Differenzen der berechneten und der beobachteten Werte für Y_t ein Minimum wird.

Denken wir uns die halbe Periode (π) in m (z. B. 12) Teile geteilt, so gibt es m d. i. 12 beobachtete Werte von Y_t in der Halbwelle für die Zeitpunkte:

$$0, \frac{2 \pi}{2 m}, \frac{4 \pi}{2 m}, \frac{6 \pi}{2 m}, \frac{8 \pi}{2 m} \dots, \frac{2 (m - 1) \pi}{2 m},$$

die wir $Y_1, Y_2, Y_3 \dots, Y_{12}$ nennen wollen.

Die Koeffizienten c_k und d_k haben nach den Regeln der Methode der kleinsten Quadrate alsdann folgende Werte:

$$c_k = \frac{2}{12} \cdot \left\{ Y_1 \cdot \cos k \cdot \frac{2 \pi}{24} + Y_2 \cdot \cos k \cdot \frac{4 \pi}{24} + Y_3 \cdot \cos k \cdot \frac{6 \pi}{24} + \dots + Y_{11} \cdot \cos k \cdot \frac{22 \pi}{24} - Y_{12} \right\} \dots \dots \dots 4)$$

$$d_k = \frac{2}{12} \cdot \left\{ Y_1 \cdot \sin k \cdot \frac{2 \pi}{24} + Y_2 \cdot \sin k \cdot \frac{4 \pi}{24} + Y_3 \cdot \sin k \cdot \frac{6 \pi}{24} + \dots + Y_{11} \cdot \sin k \cdot \frac{22 \pi}{24} \right\} \dots \dots \dots 5)$$

Nunmehr setzt man:

$$c_k = a_k \cdot \sin \alpha_k \text{ und } d_k = a_k \cdot \cos \alpha_k \dots \dots 6)$$

und erhält daraus die Gleichung der Stromkurve in der Form 3).

$$Y_t = a_1 \cdot \sin (\omega \cdot t + \alpha_1) + a_2 \cdot \sin (2 \omega t + \alpha_2) + a_3 \cdot \sin (3 \omega t + \alpha_3) + \dots$$

In den weitaus häufigsten Fällen werden drei Glieder der Entwicklung genügen.

Auch auf graphischem Wege kann man nach einem von Houston und Kennely¹⁾ angegebenen Verfahren die Koeffizienten c_k und d_k bestimmen.

Um z. B. den Koeffizienten d_k der Sinusreihe zu ermitteln, teilt man das Intervall π (eine halbe Wellenlänge) der auf recht gleichmäßiges Papier aufgezeichneten Kurve in k gleiche Teile und bestimmt durch Ausschneiden der Papierstücke und Wägen derselben mit einer genauen Wage die Differenz F der Flächen zwischen der Summe

¹⁾ Electrical World, 1898.

der geradzahigen Flächenstücke und der Summe der ungeradzahigen Flächenstücke.¹⁾ Dann ist:

$$d_k = \frac{\pi \cdot F}{\lambda} \dots \dots \dots 7)$$

wenn λ die Länge einer ganzen Welle ist.

Um die Koeffizienten c_k der Cosinusreihe zu finden, legt man Teilungslinien mitten zwischen die vorigen Teilungslinien und bildet wieder die Differenz F' der geradzahigen und ungeradzahigen Flächenstücke. Dann ist:

$$c_k = - \frac{\pi \cdot F'}{\lambda} \dots \dots \dots 8)$$

➤ Selbstverständlich muß man in diesem Falle ein einer halben Teilungswerte der Welle entsprechendes Stück der nächsten Halbwelle hinzunehmen und das vor der ersten Teilungslinie liegende Flächenstück weglassen.

Um die Koeffizienten der Grundwelle c_1 und d_1 zu finden, bestimmt man den Flächeninhalt \mathfrak{F} der ganzen Halbwelle von 0 ausgehend und den Inhalt \mathfrak{F}_1 der Fläche der Halbwelle von $\frac{\lambda}{4}$ ausgehend unter Hinzunahme des ersten Viertels der folgenden Welle. Dann ist:

$$d_1 = \frac{\pi \mathfrak{F}}{\lambda} - \frac{d_3}{3} + \frac{d_5}{5} - \frac{d_7}{7} + \dots \dots \dots 9)$$

$$c_1 = - \frac{\pi \mathfrak{F}_1}{\lambda} + \frac{c_3}{3} - \frac{c_5}{5} + \frac{c_7}{7} - \dots \dots \dots 10)$$

Bei diesen Messungen werden alle oberhalb der Nulllinie liegende Flächenstücke positiv, alle unterhalb liegenden negativ gerechnet.

Die Genauigkeit dieses graphischen Verfahrens ist für praktische Bedürfnisse meist ausreichend.²⁾

¹⁾ Genauere Ergebnisse erzielt man selbstverständlich durch Anwendung eines Planimeters.

²⁾ Eingehendere Mitteilung über dieses von Bragstadt verbesserte graphische Verfahren findet man in Arnold, Wechselstromtechnik, Bd. I, S. 154. Eine andere Methode hat Loppé, L' Eclair. Electr. 1902, Heft 26, angegeben.

11. Kapitel.

Allgemeines über Wechselstrommaschinen.

1. Geschichtliches.

Die ersten elektrischen Maschinen, die konstruiert worden sind, waren Wechselstrommaschinen, deren Feldmagneten durch permanente Magnete gebildet wurden; erst später sind diese Maschinen durch Hinzufügung von Kommutatoren in intermittierende Ströme liefernde Gleichstromerzeuger umgewandelt worden.

Da die Teilung des elektrischen Lichtes, d. h. der gleichzeitige Betrieb mehrerer Gruppen von Bogenlampen in voneinander unabhängigen Stromkreisen, zuerst mit Wechselstrom gelang, so schien es sogar einige Zeit, als ob die Wechselstrommaschine den Vorrang in den technischen Anwendungen der Elektrizität erlangen sollte. — Nachdem aber durch die Erfindung der Nebenschluß- und gemischten Gleichstrommaschinen für unveränderliche Klemmenspannung und durch die Konstruktion geeigneter Bogenlampen der Betrieb parallel geschalteter Beleuchtungskörper auch durch Gleichstrom gelungen war, traten mehrere Jahre hindurch die Wechselstrommaschinen mehr und mehr in den Hintergrund. Einzelne Elektrotechniker glaubten in jener Zeit sogar schon diese Maschinen als gänzlich veraltet ins alte Eisen verweisen zu dürfen.

Durch die Erfindung der Transformatoren durch Gaulard und deren praktische Umgestaltung durch Déri und Blâthy, und weiterhin durch die Erfindung des magnetischen Drehfeldes durch Ferraris, Tesla und andere wurden jedoch der Wechselstromtechnik neue Bahnen erschlossen, und die Wechselstrommaschinen gelangten zu neuer, vorher nicht geahnter Bedeutung.

Ganz neuerdings hat die hohe technische Vollendung, zu der die Erfindung der Mehrphasenmotoren durch Galileo Ferraris und Nikolaus Tesla, durch die Konstruktionen der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft, Browns, der Maschinenfabrik Oerlikon, Siemens & Halske und anderer geführt worden ist, für den Großbetrieb dem mehrphasigen Wechselstrom, besonders dem sogenannten Drehstrom, das Übergewicht gesichert.

Überall, wo elektrische Ströme von hohen Spannungen zur Verwendung kommen müssen, um mit verhältnismäßig geringen Leitungsquerschnitten in größere Entfernungen Energie übertragen zu können, bedient man sich fast ausschließlich der Wechselströme, da die dauernde Isolierung der Kollektorsegmente voneinander der Erzeugung von Gleichströmen von hoher Spannung erhebliche Schwierigkeiten und ein Element großer Betriebsunsicherheit entgegenseht.

Bei einer großen Zahl neuerer Konstruktionen von Wechselstrommaschinen ruhen sämtliche stromführenden Leiter und werden nur noch Eisenteile bewegt. Bei solchen Maschinen gibt es dann nicht einmal mehr Schleifringe und Bürsten; alle Teile, an denen gelegentlich Funken auftreten könnten, fallen weg.

Die Zahl der Stromwechsel in der Sekunde darf nicht zu klein sein, da sonst das Licht der Bogenlampen und auch das von Glühlampen mit dünnen Kohlenfäden ein störendes Flimmern zeigen. Die gebräuchlichen Periodenzahlen liegen zwischen 40 und 120 in einer Sekunde. In Deutschland hat man sich fast durchgängig für eine Zahl von 50 vollen Perioden in 1 Sekunde entschieden.

Es ist leicht ersichtlich, daß man eine so große Anzahl von Perioden nicht dadurch erreichen kann, daß man eine einzelne Spule in einem einfachen Magnetfelde rotieren läßt, wie dies seiner Zeit (Grundzüge der Gleichstromtechnik, Kapitel XIX, 2., S. 357) bei Besprechung der denkbar einfachsten Wechselstrommaschinen angenommen war. Man würde dann auf so hohe Winkelgeschwindigkeiten geführt werden, daß die Beanspruchung der rotierenden Teile der Maschinen durch Zentrifugalkraft und die Verluste durch Reibungswiderstände aller Art zu groß werden würden. Diese Betrachtung ergibt von selbst, daß man den Anker aus verschiedenen Spulen oder einer größeren Zahl von Windungen zusammensetzen wird, die sich auf die ganze Oberfläche des Ankers möglichst gleichmäßig verteilen, und daß man diese Spulen durch eine größere Zahl von Magnetfeldern entgegengesetzten Vorzeichens hindurch führen wird, wie solche durch eine vielpolige Anordnung der Feldmagneten erzeugt werden können (vergl. Gleichstromtechnik S. 500).

2. Einteilung der Wechselstrommaschinen.

Die Wechselstrommaschinen können nach verschiedenen Gesichtspunkten eingeteilt werden.

Nach der Beschaffenheit des Ankers zerfallen sie zunächst in solche mit Scheibenanker, und das ist die Art, die unter den älteren Konstruktionen am häufigsten vorkommt, ferner in Maschinen mit Ringanker, in Maschinen mit Trommelanker und in Maschinen mit Pol- oder Zackenankern.

Auch können diese Maschinen darnach eingeteilt werden, auf welche Weise die Änderungen der die Ankerspulen durchschneidenden Kraftlinien hervorgebracht werden. Bei der einen haben die Kraftlinien einen nahezu festliegenden Weg, und die Ankerspulen werden durch denselben hindurchgeführt, das sind die Wechselstrommaschinen mit feststehenden Feldmagneten und rotierendem Anker.

Bei anderen Maschinen (und diesem Typus gehören fast alle modernen Wechselstromerzeuger an) steht der Anker fest, und die Feldmagneten werden an demselben vorüber geführt, das sind die Maschinen mit beweglichen Elektromagneten und feststehendem Anker.

Bei einer dritten Gruppe ist nur der Weg der Kraftlinien veränderlich, und die Induktionswirkung wird durch Veränderungen der Kraftlinienzahl erzeugt, die durch die Spulen hindurchgehen; hierher gehören die sogenannten Induktormaschinen, bei denen alle von Strömen durchflossenen Kupferleiter feststehen können und nur ein Eisenkörper in einem Magnetfelde bewegt wird.

Ein weiterer grundsätzlicher Unterschied ist der, ob die aufeinander folgenden Pole der Feldmagneten verschieden sind oder gleiches Vorzeichen haben. Die Maschinen erster Art heißen Wechselpolmaschinen, die der zweiten Art Gleichpolmaschinen. Die Gleichpolmaschine hat für dieselbe Periodenzahl nur halb so viele Pole als eine Wechsepolmaschine; die Pole müssen aber mehr als doppelt so viel Kraftlinien führen; mehr als die doppelte Kraftlinienzahl, weil zwischen den gleichnamigen Polen kräftige Streufelder vorhanden sind.

Ein Gesichtspunkt, der nicht zu durchschlagenden Unterscheidungen führt, ist der, ob der Anker Eisen enthält oder ob dies nicht der Fall ist. Die meisten Konstruktionen können ohne grundsätzliche Änderungen der Gesamtanordnung entweder so gebaut werden, daß der Anker mit Eisen versehen wird, oder so, daß der Hohlraum der Ankerspulen mit einem nichtmagnetischen Materiale ausgefüllt wird. Maschinen letzterer Art sind jetzt ganz selten geworden. In Maschinen ohne Eisen ist zwar der Hysteresisverlust gleich Null, aber durch den Luftraum wird der magnetische Widerstand außerordentlich vergrößert; es wird somit bei Maschinen dieser Art ein viel größerer Energieaufwand für die Erregung nötig. — Eisenkerne haben außerdem den Vorteil dem Anker eine größere Festigkeit zu geben, als sie bei Gebrauch von nichtmagnetischem Material erreicht werden kann.

Einen weiteren Einteilungsgrund bildet die Art der Erregung der Feldmagneten. Bei der einen Gruppe von Wechselstrommaschinen

werden die Feldmagneten durch Gleichstrom erregt, der von einer Gleichstrommaschine herrührt, die entweder gesondert angetrieben wird, oder deren Anker auf der rotierenden Achse der Wechselstrommaschine mit befestigt ist. Auch werden Akkumulatorenbatterien zur Speisung der Feldmagneten solcher Maschinen mit Fremderregung verwendet.

Bei selbsterregenden Wechselstrommaschinen wird entweder der Strom einiger Spulen des Ankers durch einen Gleichrichter in Gleichstrom verwandelt, oder ein Teil des erzeugten Hauptstromes wird zuvor durch einen Transformator in Strom geringer Spannung umgewandelt, dann durch einen Kommutator in einen pulsierenden Gleichstrom umgesetzt und hierauf um die Feldmagnete herumgeführt.

Auch nach der Art der Wechselströme, die erzeugt werden, können die Wechselstrommaschinen eingeteilt werden, je nachdem dieselben gewöhnlichen (einphasigen) Wechselstrom, zweiphasigen unverketteten oder verketteten Wechselstrom, oder endlich drei- oder mehrphasigen Wechselstrom liefern.

3. Einfacher Fall der Bewegung einer Spule in einem mehrpoligen Felde.

Wir stellen uns zunächst vor, wir hätten eine Anzahl abwechselnd entgegengesetzter magnetischer Felder I, II, III, wie solche z. B. bei

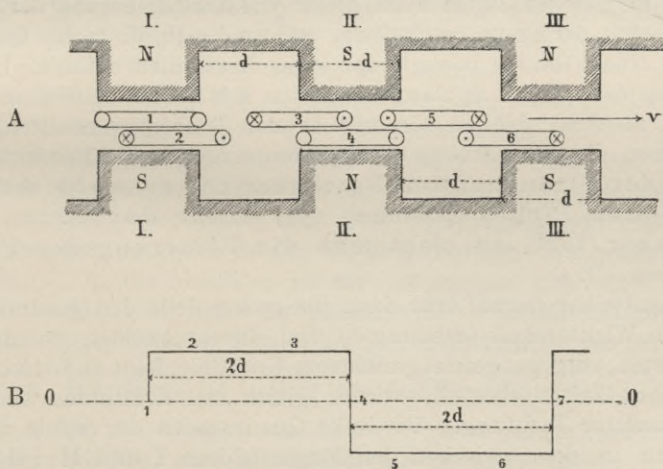


Fig. 86. Eine einzelne Spule, deren Weite gleich der Polbreite ist, bewegt sich in einem mehrpoligen Felde.

den Wechselstrommaschinen von Siemens und denen von Ferranti vorkommen, und zwischen diesen Feldern bewege sich zunächst eine einzige Spule. Der Einfachheit wegen zeichnen wir den Durchschnitt

so, als ob die Magnetfelder in einer Geraden angeordnet wären; tatsächlich liegen dieselben auf Kreisperipherien in gleichen Winkelabständen nebeneinander. Wir nehmen daher vorläufig auch an, die Spule glitte parallel dieser Geraden mit gleichförmiger Geschwindigkeit v hin. Die Weite der Spule sei d , wenn unter d die Breite jedes Feldes und des Zwischenraumes zwischen zwei benachbarten Feldern von entgegengesetztem Vorzeichen verstanden wird. (Vergl. Fig. 86). Die Größe d , der halbe Abstand zweier Polmitten gleichen Vorzeichens, heißt Teilung.

Wir betrachten die Induktionsvorgänge, die in der Spule eintreten, wenn sich dieselbe in den aufeinander folgenden Stellungen 1, 2, 3, 4 . . . befindet.¹⁾

Die in der Spule in den verschiedenen Stellungen induzierten EMKräfte sind als Ordinaten auf der Linie 00 nach Größe und Richtung in der unteren Figur B abgetragen.

Es ist klar, daß die in der mit der Geschwindigkeit v vorübergeführten Spule induzierte EMK gleich Null ist, wenn die Spule gerade ringförmig ein Magnetfeld umschließt (Stellung 1 in Fig. 86). Die induzierte EMK bleibt nahezu unveränderlich, solange die rechte Seite der Spule von dem rechten Rande des Kraftlinienfeldes I bis zum linken Rande des Feldes II fortschreitet (Stellung 2). Denn bei dem Fortschreiten der Spule mit gleichförmiger Geschwindigkeit v werden in gleichen Zeiten auch gleich viel Kraftlinien von der linken Quadratseite der Spule geschnitten, während sich die rechte Quadratseite in einem Raume bewegt, der keine Kraftlinien enthält. Um die Richtung der in den Spulen induzierten EMKräfte deutlicher sichtbar zu machen, denken wir uns in den Drahtquerschnitten Pfeile gezeichnet, die die Richtung der dadurch erzeugten Ströme andeuten. Fließt der Strom auf den Beschauer zu, so sieht man die Spitze des Pfeiles (Zeichen \odot); fließt der Strom vom Beschauer fort, so sieht man die Fiederung des Pfeiles (Zeichen \otimes).

Unmittelbar darauf tritt dann die rechte Seite der quadratischen Spule in Wirksamkeit (Stellung 3) und durchschneidet, solange sie im nächsten, entgegengesetzt gerichteten Kraftlinienfelde II fortschreitet, in gleichen Zeiten ebenfalls wieder gleich viel Kraftlinien von entgegengesetzter Richtung. Die linke Quadratseite der Spule bewegt sich nun in dem zwischen den Magnetfeldern I und II gelegenen Raume, in dem keine Kraftlinien liegen, die linke Quadratseite erfährt somit jetzt keine Induktionswirkung. Es wird dann noch längs

¹⁾ Um die Deutlichkeit der Figur zu erhöhen, haben wir die verschiedenen Stellungen in zwei Linien untereinander angeordnet; in Wirklichkeit bewegt sich die Spule in den Stellungen 1, 2, 3 . . . in derselben Geraden fort.

dieses Weges eine gleich große EMK induziert, so lange bis die Spule wieder das ganze Kraftlinienfeld II gerade umfaßt (Stellung 4), wobei die EMK Null wird. Da die Spule zunächst als in sich geschlossenes Quadrat gedacht wird, veranlaßt die entgegengesetzt gerichtete Induktionswirkung auf die rechte Quadratseite der Spule einen Strom, der in derselben Richtung die Spule durchfließt, wie ihn die Induktion auf die linke Quadratseite in dem entgegengesetzten Felde I hervorbrachte. Die EMK besitzt daher noch die gleiche Größe und gleiches Vorzeichen. Sowie aber die rechte Quadratseite das Feld II verläßt und in den von Kraftlinien freien Raum eintritt, schneidet nur die linke Quadratseite Kraftlinien, die den im Felde I entgegengesetzt gerichtet sind. Es wird nunmehr, wie auch die Richtungsbezeichnung in den Drahtquerschnitten andeutet, eine der bisherigen entgegengesetzt gerichtete EMK induziert, und diese bleibt erhalten, bis die Spule das Feld III gerade umfaßt. — Nunmehr ist genau derselbe relative Zustand erreicht wie in Stellung 1; daher wiederholt sich bei dem weiteren Fortschreiten der Spule der beschriebene Vorgang.

Es entsteht somit eine aus Rechtecken zusammengesetzte Wellenlinie, wie wir sie unmittelbar darunter gezeichnet haben. Die mittlere EMK ist theoretisch gleich der maximalen EMK.

Die soeben angestellte Betrachtung zeigt, daß in jedem Augenblicke von jeder Ankerwirkung immer nur eine der vier Seiten des Quadrates der Induktionswirkung ausgesetzt ist, während die drei anderen nur als Widerstand in Betracht kommen.

Daraus ergibt sich, daß die quadratische Form und gleiche Breite der Pole und Spulen wegen der unvollkommenen Ausnutzung des Drahtes unzweckmäßig ist, daß man vielmehr die Form der Spulen in der zur Bewegungsrichtung und zum Verlaufe der Kraftlinien senkrechten Richtung verlängern muß und dementsprechend den Polen der Feldmagneten und den Spulen längliche Formen statt quadratische zu geben, d. h. die Maschine breiter zu machen hat. Wir wollen nunmehr zusehen, ob nicht ein günstigeres Verhältnis zwischen der Breite der Spule und der Breite der Pole aufgefunden werden kann.

4. Die Spule ist breiter als das Kraftlinienfeld.

Wir wollen im übrigen zunächst bei dem zuletzt betrachteten Falle stehen bleiben, aber annehmen, die Spule sei breiter als eine Polbreite; die Spulenbreite sei l , die Polbreite sei d . Die Spule ist dann kein Quadrat mehr, sondern ein Rechteck mit der Länge l und Breite d .

Es ist klar, daß dann auf die Länge $l-d$ des Weges der Spule, während dessen sich sowohl die rechte als die linke Seite der

Spule in einem nicht mit Kraftlinien erfüllten Raume bewegt (Stellung 1 in Fig. 87), keine EMK induziert wird, weil überhaupt keine Kraftlinien vom Drahte geschnitten werden.

Solange dann bei Verschiebung der Spule zwischen den Feldern nur die linke Seite der Spule allein sich im ersten Felde I bewegt (Stellung 2), wird dieselbe EMK induziert, wie im früher betrachteten Falle, wenn Feldstärke, Geschwindigkeit und induzierte Drahtlänge gleich groß sind. Die Länge dieses Weges ist $2d - l$. Sowie aber dann die rechte Seite der Spule in das zweite Kraftlinienfeld eintritt, wird die EMK doppelt so groß, weil die in der rechts und

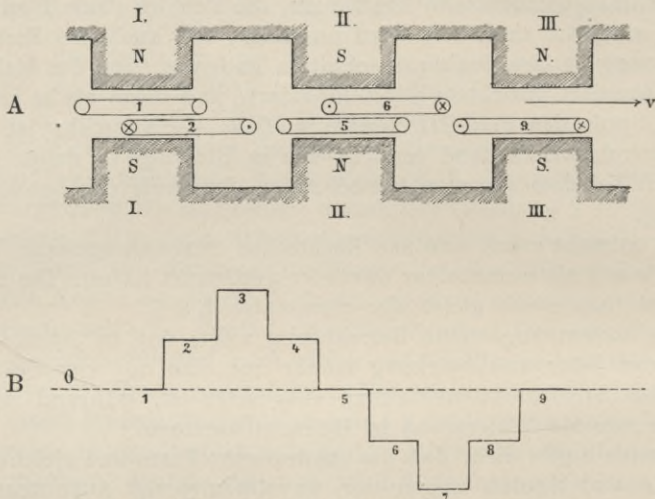


Fig. 87. Die Spulenbreite l ist größer als die Polbreite.

links gelegenen Drahtseite induzierten gleichgroßen EMKräfte sich addieren (Stellung 3)¹⁾, weil sie zur Entstehung gleichgerichteter Ströme in der Spule Anlaß geben. — Auf einem weiteren Wege von der Länge $2d - l$, solange sich nur die rechte Seite der Spule allein im zweiten Felde befindet, ist die EMK von gleicher Größe wie in Stellung 2 und von gleichem Vorzeichen wie dort (Stellung 4).

Wenn dann auf der Weglänge $l - d$ beide Seiten der Spule in den von Kraftlinien freien Räumen sich bewegen (Stellung 5), ist die EMK Null. Nunmehr wechselt (Stellung 6) die EMK ihr Vorzeichen, wird doppelt so groß (Stellung 7), Null u. s. f. Auch weiterhin wechseln kürzere Strecken, in denen die EMK die frühere Größe erlangt, mit Strecken, auf welchen die EMK den doppelten Wert, und mit Strecken, auf denen sie den Wert Null hat. Die Linie, die

¹⁾ Stellung 3, 4 und 7, 8 sind nicht mit abgebildet.

den Verlauf der EMK als Funktion der Zeit darstellt, zeigt eine treppenförmige Gestalt. Die effektive EMK ist dieselbe geblieben, die maximale EMK ist auf den doppelten Wert gewachsen. Infolge der doppelt so hohen Maxima der EMK wird die Isolation doppelt so stark beansprucht als vorher.

Selbst wenn man Spule dicht an Spule legen könnte, könnte man doch nur im Verhältnis von $\frac{d}{1}$ weniger Spulen auf dem Ankerumfang anbringen, als im vorher betrachteten Falle. Die gesamte elektromotorische Kraft sämtlicher hintereinander geschalteter Spulen

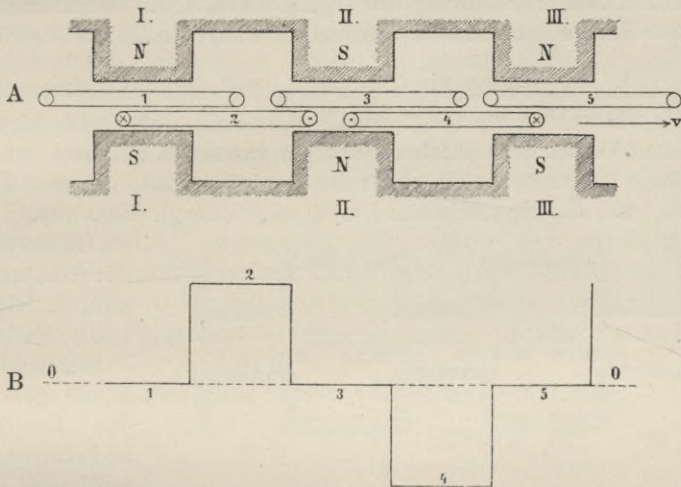


Fig. 88. Die Spule ist doppelt so breit als die Polbreite und als der Polabstand.

des Ankers würde somit im gleichen Verhältnis geringer ausfallen. Die Anwendung von Spulen, die breiter sind als die Pole, würde somit, wenn die Pole um ihre eigene Breite voneinander abstehen, nur Nachteile im Gefolge haben.

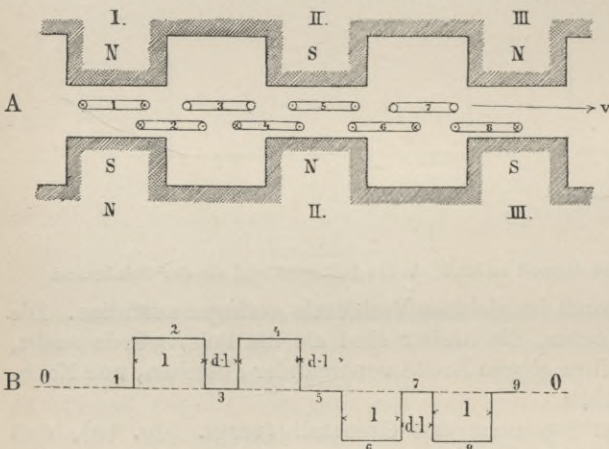
Wir betrachten nunmehr den Grenzfall (vergl. Fig. 88), daß sich eine Spule von der Länge $l = 2d$ zwischen Feldern von abwechselnd entgegengesetzter Richtung der Kraftlinien bewegt, zwischen denen gleichbreite Felder ohne Kraftlinien liegen. Während eines Weges von der Länge d summieren sich die Induktionswirkungen, die auf beiden Spulenseiten ausgeübt werden (Stellung 2); die EMK ist daher $2e$. Während eines ebenso langen Weges bewegen sich beide Drähte in Räumen, die keine Kraftlinien enthalten, die EMK ist somit Null (Stellung 1 und 3). Hierauf tritt die rechte Spulenseite (Stellung 4) in das dritte, die linke Spulenseite in das zweite Kraftlinienfeld ein, die EMKräfte, die in beiden Seiten induziert werden, haben in bezug

auf die in der Spule zu erzeugenden Ströme gleiche Vorzeichen, sie addieren sich; die EMK hat nunmehr längs des Weges d den Wert $2e$; dann wird sie wieder auf einem ebenso langen Wege (Stellung 5) gleich Null u. s. f.

Die effektive EMK wird demnach nicht vergrößert, sondern nur anders verteilt. Wegen der Verdoppelung der Spannung muß die Isolierung der Drähte wesentlich verstärkt werden. Infolge der Verbreiterung der Spulen werden auch die an der Induktionswirkung nicht teilnehmenden Drahtstücke verlängert, und die Zahl der Spulen, die auf einer gegebenen Länge untergebracht werden kann, wird vermindert. Die Verbreiterung der Spule bietet somit auch in diesem Falle nur Nachteile und keine unmittelbar wahrnehmbaren Vorteile dar.

5. Die Spulen sind weniger breit als die Pole.

Wir betrachten zunächst wieder den Fall, daß rechteckige Pole ungleichen Vorzeichens aufeinanderfolgen, zwischen welchen von Kraftlinien freie Felder von gleicher Breite d gelegen sind, nehmen diesmal aber an, daß die Spulenbreite $l < d$ sei. (Vergl. Fig. 89).



Gehen wir von der Stellung (1) aus, in der die linke Seite der rechteckigen Spule gerade in das Kraftlinienfeld eintritt, während die vorangehende Seite schon innerhalb des Feldes befindet. Beide Seiten schneiden dann in gleicher Zeit gleich viel Kraftlinien, die in beiden

Fig. 89. Die Spulenbreite ist kleiner als die Breite der Pole und die gleichen Polabstände.

den Seiten induzierten, gleichen EMKräfte wirken aber in der Spule entgegengesetzt und heben sich innerhalb der Verbindungsstücke auf; eine Wirkung nach außen findet nicht statt. Auf dem Wege $d-l$ ist somit die von der Spule nach außen abgegebene EMK gleich Null. Sowie dann (Stellung 2) die rechte Seite der Spule in den von Kraftlinien freien Raum zwischen Feld I und II eintritt, wird in der nachfolgenden linken Spulenseite noch immer die nämliche EMK entwickelt, und zwar längs eines Weges von der Länge l .

Wenn aber nunmehr (Stellung 3) auch die linke Seite das Kraftlinienfeld I verläßt, bewegen sich beide in Betracht kommenden Spulenseiten längs des Weges $d-l$ in einem kraftlinienfreien Raume, und es wird keine EMK induziert; es treten also auch keine schädlichen Ströme innerhalb der Spule auf. Sowie dann (Stellung 4) die rechte Seite der Spule in das zweite gleichgerichtete Kraftlinienfeld II eintritt, wird nunmehr wiederum eine EMK von der Größe $+e$ auf einer Strecke l entwickelt. Der zuerst betrachtete Fall, daß in beiden Seiten der Spule gleichgerichtete, aber sich aufhebende EMKräfte induziert werden, tritt wieder ein, wenn dann auch die nachfolgende, linke Spulenseite in das zweite Kraftlinienfeld hineingeführt wird. Man erhält also in diesem Falle einen Wechselstrom, der aus je zwei gleichgerichteten Stromstößen besteht, die durch ein Stück vom Werte Null getrennt sind; dann folgen ebenso zwei entgegengerichtete Stromstöße u. s. f. (Vergl. die untere Linie B der Fig. 89). Die effektive EMK ist erheblich niedriger als die maximale. Es ist ohne weiteres klar, daß es in diesem Falle zweckmäßig wäre, die von Kraftlinien freien Felder nicht auch ebenso breit wie die Pole zu machen, sondern dieselben nur gleich l zu machen, dann würde der mit Stellung 3 beginnende Abschnitt von der Länge l bis d , in dem keine EMK entwickelt würde, in Wegfall kommen, und die effektive EMK würde dadurch relativ vergrößert werden.

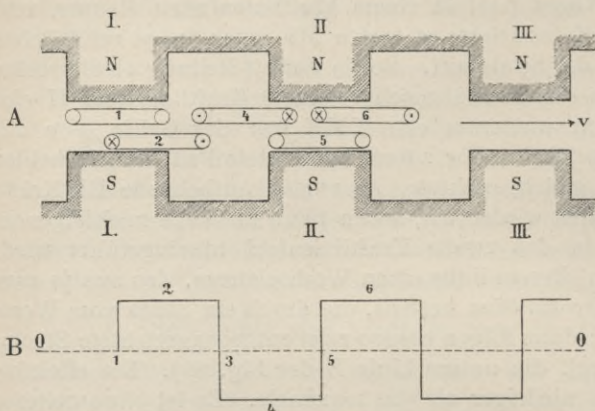
6. Es folgen sich Felder von gleicher Richtung.

Nur kurz wollen wir noch den Fall erörtern, daß unter sonst gleichbleibenden Verhältnissen nicht entgegengesetzt gerichtete, sondern gleiche magnetische Kraftlinienfelder sich folgen. Zunächst sollen zwischen den Magnetfeldern kraftlinienfreie Felder von gleicher Breite gelegen sein.

Die Spulenbreite ist gleich der Polbreite.

Die Betrachtungen, die an die Stellungen 1 und 2 des ersten derartigen Beispiels (Kap. 11, 3., S. 135) angeknüpft worden sind, bleiben dann völlig gültig (vgl. Fig. 86). Sowie aber (Stellung 3, Fig. 90) die vorauslaufende rechte Seite der Spule das zweite Kraftlinienfeld erreicht, und die linke Spulenseite aus I austritt (Stellung 3 ist nicht gezeichnet), wird eine der vorigen entgegengerichtete EMK bis e induziert (Stellung 4) und solange erhalten, bis auch die nachfolgende linke Spulenseite das Kraftlinienfeld II erreicht hat (Stellung 5). Verläßt nun die rechte Spulenseite das II. Kraftlinienfeld, so wird nunmehr die linke Seite der Spule längs eines Weges $l-d$ Kraftlinien schneiden. Es ist jetzt derselbe Fall erreicht, der in Stellung 2 dargestellt wurde.

Man erhält somit in diesem Falle dieselbe EMK, wie wenn Felder von abwechselnd entgegengesetzter Richtung sich folgen. Die effektive



EMK ist wieder gleich der maximalen, die Wechselzahl ist aber unter sonst gleichbleibenden Umständen doppelt so groß geworden, als wenn Felder von abwechselnd entgegengesetzter Polarität sich folgen.

Fig. 90. Gleichnamige Pole, zwischen denen gleichbreite Räume ohne Kraftlinien liegen. Die Spule ist ebenso breit als die Pole.

Zuerst ist eine derartige Anordnung

von Mordey bei einer Maschine gewählt worden; aber auch bei gewissen Maschinen der Induktionstypen kommt diese Betrachtung zur Anwendung.

7. Die Räume zwischen den aufeinander folgenden Magnetfeldern sind schmaler als die Polbreite.

Daß die Verbreiterung der Zwischenräume, in denen sich keine Kraftlinien befinden, keine Vorteile darbieten kann, ist ohne weiteres einzusehen, dieser Fall bedarf daher keiner besonderen Untersuchung. Wiederholt sind wir aber schon bei der Betrachtung der vorhergehenden Fälle darauf gekommen, daß man zu günstigeren Verhältnissen hinsichtlich der Ausnutzung der Ankeroberfläche und der Drahtwicklung kommen kann, wenn man die Zwischenräume zwischen den Magnetfeldern verkleinert. Wir wollen daher die verschiedenen Möglichkeiten, die sich unter dieser Voraussetzung ergeben, in ähnlicher Weise wie bisher erörtern.

Die Ankerspule ist gleich der Polbreite.

Wenn zunächst (Fig. 91, Stellung 1) die Spule gerade das Feld umfaßt, findet keine Induktion statt. Sowie aber die rechte, voranschreitende Spulenseite in den Zwischenraum des Feldes I und II eingetreten ist (Stellung 2), wird in der nachfolgenden, linken Spulenseite, die in jedem gleichen Zeitabschnitte gleichviele Kraftlinien schneidet, die EMK $+e$ induziert. Wenn dann die voranschreitende rechte Spulenseite in das Feld II eingetreten ist (Stellung 3), wird

auch da die EMK $+e$ induziert. Da sich die linke Spulenseite noch im Feld I bewegt, und ebenfalls eine in gleichem Sinne wirkende Induktion erfährt, so steigt die EMK auf $+2e$ und behält diesen Wert, bis die linke Spulenseite in den von Kraftlinien freien Raum zwischen Feld I und II eintritt. Dann sinkt die EMK wieder auf $+e$ (Stellung 4). Sobald (Stellung 5) die Spule das Kraftlinienfeld II umfaßt, die Spulenmitte mit der Polmitte zusammenfällt, wird die EMK Null. Unmittelbar darauf tritt die rechte Spulenseite in den Zwischenraum ein, der das Feld II und III trennt. Die linke Spulenseite bewegt sich in Feld II (Stellung 6), und die EMK $-e$ wird induziert.

Geht dann die rechte Spulenseite in das Feld III über und bewegt sich die nachfolgende Spulenseite noch im Feld II (Stellung 7, in der Figur nicht gezeichnet), so steigt die EMK auf $-2e$.

Verläßt die linke Spulenseite das Feld II, so bleibt die rechte Spulenseite noch eine Zeit lang im Felde III, und die induzierte EMK sinkt auf $-e$.

Wenn dann die Spule das Feld III gerade umfaßt, wird die EMK wieder Null, und es ist der Zustand wieder erreicht, den wir in Stellung 1 bereits erledigt haben.

Da der Weg, auf dem sich der ganze Vorgang abspielt, kürzer ist als z. B. in dem in Fig. 87, S. 138, erörterten Falle, so ist tatsächlich ein gewisser Vorteil erreicht. Auch kann leicht eingesehen werden, daß dieser Vorteil um so größer wird, je schmaler die Räume sind, die keine Kraftlinien enthalten.

Aus Betrachtungen, die denjenigen ähnlich sind, die wir in den vorhergehenden Abschnitten angestellt haben, geht hervor, daß die Verringerung der Zwischenräume im allgemeinen Vorteile mit sich bringt. Die Wahl von Spulen, die breiter oder schmaler sind als die Magnetfelder, zwischen denen sie hindurch geführt werden, hat keine Vorteile, wohl aber Nachteile im Gefolge.

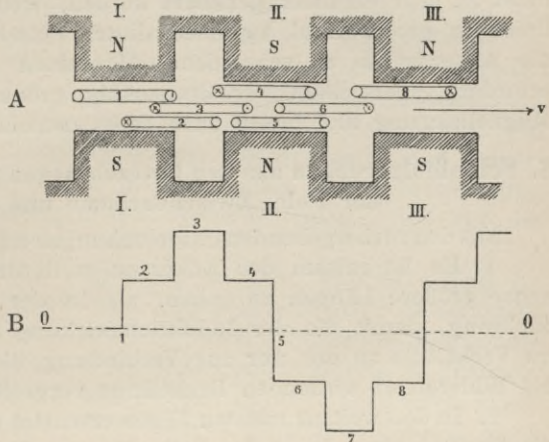


Fig. 91. Zwischen entgegengesetzten Polen befinden sich schmalere Zwischenräume. Die Spule ist ebenso breit als die Pole.

Ganz ähnlich gestalten sich auch die Ergebnisse der Betrachtungen, wenn man die von Kraftlinien freien Zwischenräume zwischen gleichen Polen verkleinert. Wir verzichten jedoch darauf, auch diese Betrachtungen durchzuführen.

Die Beschränkung der Zwischenräume, die von Kraftlinien leer sind, hat aber natürliche Grenzen. Liegen die magnetisierenden Windungen um die Pole herum, so muß für diese Erregerspulen der nötige Platz bleiben. Verwendet man übergreifende Polschuhe, so dürfen auch die Eisenteile abwechselnd entgegengesetzter Pole nicht zu sehr einander genähert werden, weil sich sonst die Kraftlinien in großer Zahl zwischen diesen Polschuhen schließen, ohne die Ankerdrähte zu schneiden. Maschinen mit starker Streuung erfordern aber einen verhältnismäßig größeren Aufwand für die Magnetisierung und bieten auch sonst mancherlei Nachteile dar.

8. Schlußfolgerungen aus den Betrachtungen über die Abmessungen der Pole, Zwischenräume und Spulen.

Aus den vorhergehenden Untersuchungen ergibt sich etwa folgendes:

1. Es ist ratsam den Ankerspulen in der Richtung der Drehachse größere Längen zu geben, als in der kürzeren senkrechten Richtung, damit die der Induktionswirkung ausgesetzte Drahtlänge im Verhältnis zu der nur zur Verbindung dienenden und lediglich als Widerstand wirkenden Drahtlänge vergrößert wird.

2. In den weitaus meisten Fällen erscheint es am zweckmäßigsten, die Spulenbreite gleich der Polbreite zu wählen. Bei abwechselnd entgegengesetzten Magnetfeldern kann unter Umständen eine vorteilhafte Ausnutzung des Drahtes der Bewickelung dadurch erreicht werden, daß man die Spulenbreite gleich der Summe der Breite des Poles und der Zwischenräume macht.

3. Die Zwischenräume zwischen den Magnetfeldern wird man so schmal wählen, als dies aus Rücksicht auf niedrig bleibende Werte der Streuung und wegen des für das Unterbringen der Erregerwicklung erforderlichen Raumes möglich ist.

Bei den neueren Wechselstrommaschinen findet man zumeist auch diese Bedingungen eingehalten.

Wohl zu beachten aber ist, daß die in den vorhergehenden Kapiteln angestellten Betrachtungen niemals streng zur Anwendung kommen können.

Wie wir schon bei den Gleichstrommaschinen früher erwähnten, sind die Kraftlinien nicht auf den Raum der Polfläche beschränkt und innerhalb desselben nicht gleichförmig verteilt, wie wir dies hier zunächst stillschweigend angenommen haben. Da gleich gerichtete Kraftlinien sich abstoßen, so treten dieselben zum Teil in die Zwischen-

räume zwischen den Magnetfeldern über, die Dichte der Kraftlinien ändert sich daher nirgends plötzlich, sondern allmählich und stetig.

In den Kurven der EMK, die wir vorher vom rein theoretischen Standpunkte aus konstruiert haben, finden daher in Wirklichkeit nirgends schroffe Abfälle in vertikalen Linien statt, und die Linien haben keine Ecken. Aus den horizontalen und vertikalen Linien, die mehr oder weniger richtige Abstufungen zeigen, werden vielmehr in Wirklichkeit krumme Linien, die ganz allmähliche Übergänge besitzen. Außerdem müssen wir der Vollständigkeit wegen noch hinzufügen, daß die hier behandelten Fälle noch durchaus nicht alle Möglichkeiten erschöpfen, die bei ausgeführten Wechselstrommaschinen vorkommen. Besonders ist der bei den meisten neueren Wechselstrommaschinen tatsächlich vorkommende Fall nicht berücksichtigt, daß die Windungen aufeinander folgender Spulen ineinander übergreifen, sodaß Ankerwindungen der folgenden Spule in dem Raume untergebracht sind, der innerhalb der Windungen der vorhergehenden Spule auf der Ankeroberfläche frei geblieben ist.

Zunächst kann leicht eingesehen werden, daß es streng genommen nicht zweier Kränze sich gegenüberstehender Feldmagnete bedarf, sondern daß der eine derselben durch ein zusammenhängendes Stück weiches Eisen ersetzt werden kann. Durch magnetische Influenz ruft dann jeder Nordpol in dem gegenüberliegenden Eisenstück einen Südpol und jeder Südpol einen gegenüberliegenden Nordpol hervor.

Soll in diesem Falle die Zahl der Kraftlinien für jedes Feld dieselbe bleiben, so muß dieselbe Zahl von Ampèrewindungen, die vorher auf den beiden gegenüberliegenden Elektromagneten verteilt war, auf dem einen vereinigt werden.

Es gibt aber auch Wechselstrommaschinen, bei denen nicht entgegengesetzte, sondern gleichnamige Magnetpole sich zu beiden Seiten eines scheibenförmigen Ankers gegenüber stehen. In diese Gruppe gehören alle Wechselstrommaschinen mit einem Ringanker, ähnlich dem Grammeringe in der flachen Form, wie sie Schuckert bei seinen älteren Dynamomaschinen, den sogenannten Flachringmaschinen, verwendete.

Die aus dem einen sich gegenüberstehenden Polpaare austretenden Kraftlinien schließen sich dann durch das Ankereisen nach dem benachbarten Polpaare von entgegengesetzter Polarität und kehren

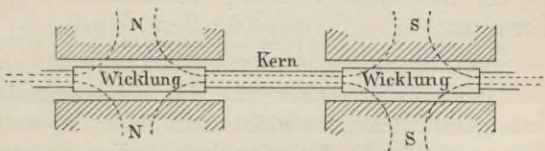


Fig. 92. Verlauf der Kraftlinien bei einer Kapschen Wechselstrommaschine mit Ringanker.

von da zu dem ersten Polpaare zurück. (Vergl. Fig. 92.) Ein Beispiel dieser Art zeigt z. B. die Wechselstrommaschine von Kapp, die wir im folgenden Kapitel 12, 1., abgebildet haben.

9. Einleitung in die Theorie der Wechselstrommaschinen.

Bleiben wir zunächst bei dem einfachsten, zuerst (Kap. 11, 3., S. 135) behandelten Falle stehen, daß alle drei Größen: die Breite der Pole, die Zwischenräume ohne Kraftlinien und die Breite der Spulen gleich sei und den Wert d haben. Besteht das Feld aus p Polpaaren, die auf der Peripherie eines Kreises angeordnet sind, so hat der Umfang des Kreises vom Durchmesser D , auf dem die Pole liegen, die Größe $4 d p$;

$$D \pi = 4 p d \dots\dots\dots 1)$$

Verschieben sich Anker und Feld derart relativ gegeneinander, daß eine Spule in 1 Minute u mal an einem bestimmten Pole vorübergleitet, so ist die relative Geschwindigkeit (Weg in 1 Sekunde) v , mit der die der Induktionswirkung ausgesetzten Seiten der Spulen durch die Kraftlinienfelder und deren Zwischenräume hindurchgehen:

$$v = \frac{u}{60} \cdot 4 p d \dots\dots\dots 2)$$

Ferner ist demnach $D \pi = \frac{v \cdot 60}{u} \dots\dots\dots 3)$

Nach den Grundgesetzen über Induktion (vergl. Gleichstromtechnik, Kap. VIII, 2., S. 166) ist die im vorliegenden Falle in einer Spule induzierte EMK e ,

$$e = d \cdot \mathfrak{B} \cdot v \text{ (absolute Einheiten)} = d \cdot \mathfrak{B} \cdot v \cdot 10^{-8} \text{ Volt.}$$

Da die Spulen quadratischen Querschnitt haben und im vorliegenden Falle nur immer eine Quadratseite Kraftlinien schneidet, so ist d die Drahtlänge, auf die in jedem Augenblicke die Induktionswirkung ausgeübt wird. Mit \mathfrak{B} bezeichnen wir die Anzahl der Kraftlinien, die aus jedem Quadratcentimeter der Fläche eines Poles jedes Feldmagneten aus- oder eintreten. Durch Einführung des Wertes von v aus Gleichung 1 nimmt der Ausdruck für die maximale EMK, die in der aus einer Windung bestehenden Spule induziert wird, die Form an:

$$e = \frac{d \cdot \mathfrak{B} \cdot u \cdot 4 p d}{60} \cdot 10^{-8} \text{ Volt} \dots\dots\dots 4)$$

Besteht der Anker aus $2 p$ hintereinander geschalteten Spulen (was jedoch praktisch nicht ausführbar ist, weil alsdann für die Drahtdicke und für die Isolation kein Raum bleiben würde), so ist die im Anker induzierte maximale EMK E , da sich die Induktionswirkung sämtlicher Spulen einfach addiert:

$$E = \frac{8 p^2 \cdot d^2 \cdot \mathfrak{B} \cdot u}{60} \cdot 10^{-8} \text{ Volt} \dots\dots\dots 5)$$

10. Vergleich der Wechselstrommaschinen und Gleichstrommaschinen.

Es liegt nahe, die soeben gefundene Formel 11 für die EMK einer einfachen Wechselstrommaschine mit dem seinerzeit für die EMK einer mehrpoligen Gleichstrommaschine abgeleiteten Ausdrucke (Gleichstromtechnik Kap. XX, 1., S. 397) zu vergleichen. In denselben Bezeichnungen, die wir hier verwendet haben, lautet dieser Ausdruck für eine Gleichstrommaschine, deren Ankerwindungen sämtlich hintereinander geschaltet sind, bis auf den Faktor 2 genau ebenso.

Eine Wechselstrommaschine und eine Gleichstrommaschine liefern somit, sofern die Umdrehungszahl, Zahl der Polpaare und Feldstärke der Magnetfelder die nämliche ist, EMKräfte, die sich wie 2 : 1 verhalten.

Bei dem Anker einer Gleichstrommaschine sind aber immer zwei Hälften der Windungen parallel geschaltet. Beanspruchen wir also die Ankerdrähte für jeden Quadratmillimeter Drahtquerschnitt mit einer gleichen Anzahl von Ampère, so kann der Anker der Gleichstrommaschine unter sonst gleichen Verhältnissen die doppelte Stromstärke liefern, ohne eine größere Energiemenge in Stromwärme umzusetzen.

Wir dürfen bei diesem Vergleiche jedoch nicht vergessen, daß wir unserer Betrachtung eine Wechselstrommaschine zugrunde gelegt haben, wie sie in Wirklichkeit nicht vorkommen kann. Wir haben nämlich angenommen, daß jede der $2p$ Ankerspulen aus einer einzigen Lage von n gleich großen Windungen bestehe, und daß jede Windung dieselbe Gestalt habe, wie die Endflächen der Magnetpole. Diese Voraussetzung wird bei den meisten derartigen Maschinen jedoch nicht erfüllt; die Ausnutzung der Länge des Ankerdrahtes ist ferner in diesem Falle eine ungünstige, da stets nur eine Quadratseite der Spule zur Wirkung kommt, während auf die anderen drei Quadratseiten keine Induktionswirkung ausgeübt wird und diese nur zur Erhöhung des inneren Widerstandes des Ankers beitragen. Der Gebrauch der für Gleichstrommaschinen so zweckmäßigen Wellenwicklung, bei der eine wesentlich günstigere Ausnutzung des Ankerdrahtes erzielt werden kann, ist für Wechselstrommaschinen, die zur Erzeugung höherer Spannungen dienen, weniger leicht verwendbar, weil dann Drähte, die sehr verschiedene Spannungen führen, in unmittelbare Nachbarschaft gebracht werden müssen, und Beschädigungen nur durch vollständiges Abwickeln des Ankers bis zur verletzten Stelle ausgebessert werden können. Gerade bei Wechselstrommaschinen ist besonderer Wert darauf zu legen, daß Ausbesserungen leicht ausgeführt werden können, und deshalb zieht man die Bewicklung des Ankers mit einzelnen Spulen vor. Ferner werden dann leicht in hintereinander geschalteten Wickelungselementen EMKräfte von verschiedener Phase erzeugt.

Selbstverständlich ist auch die Form der Spulen und Pole nicht ohne praktische Bedeutung, teils hinsichtlich der Ausnutzung des Drahtes, teils hinsichtlich der Form der Kurve, durch welche die EMK dargestellt wird. — Die beste Annäherung der Kurve, durch die man die EMK als Funktion der Zeit darstellen kann, an die Sinuslinie scheint sich zu ergeben, wenn man sowohl den Polen als den Spulen nahezu Kreisform gibt. Untersuchungen, die Joubert an älteren Wechselstrommaschinen von Siemens & Halske, die kein Eisen im Anker enthielten, angestellt hat, zeigten, daß bei Belastung solcher Maschinen mit induktionsfreien Widerständen die Kurve der EMK fast genau eine Sinoide war. Stärkere Abweichungen von der Sinoide, zumal steilere Abfälle der Kurven, ergeben sich stets, wenn Eisen im Anker enthalten ist. Auch in diesen Fällen aber kann man durch Wahl geeigneter Spulenformen und passende Verteilung der Wickelung eine große Annäherung an die Sinoide erzielen.

11. Einfluß der Breite der Pole, Zwischenräume, Spulen und der Dicke der Spulen auf die EMK; Spulenfaktor.

In wirklich ausgeführten Maschinen werden die Spulen nicht durch lineare Leiter begrenzt, sondern die Spulenwände werden eine gewisse Dicke haben, zumal wenn mehrere Windungen nebeneinander liegen. Dann wechselt die EMK nicht in allen Drähten gleichzeitig, und die Linie, welche die EMK als Funktion der Zeit darstellt, besteht nicht mehr aus aneinander gereihten Rechtecken, sondern besitzt statt der vertikalen Begrenzungslinien allmählich, schräg verlaufende Bogenstücke. Die effektive EMK wird dadurch verringert, und statt der 2 in Formel 11) tritt ein Koeffizient k ein, der von der relativen Größe der Teilung und Dicke der Spulen, Breite der Pole u. s. f. abhängt.

Betrachtet man z. B. einen einzelnen Ankerdraht, so ist die in ihm induzierte EMK $e = \mathfrak{B} \cdot l \cdot v \dots \dots \dots 14)$ wenn \mathfrak{B} die Kraftliniendichte an der betreffenden Stelle, l die Länge des Drahtes und v die absolute Geschwindigkeit ist, mit der sich derselbe durch das Feld bewegt.

Die einzelnen Ankerwindungen sind aber infolge ihrer ungleichen, relativen Lage zu den Magnetpolen in demselben Augenblicke verschiedenen magnetischen Kräften ausgesetzt. Alle entsprechenden Spulenseiten stehen aber den Polen in jedem Augenblicke in gleicher Weise gegenüber und erfahren die gleiche Gesamtinduktion.

Die in einer Spulenseite induzierte EMK wird erhalten, wenn man für jeden ihrer Drähte e nach obiger Formel bestimmt und die erhaltenen Werte addiert. Da l und v gemeinsame Faktoren aller Summanden sind, hat man alle Werte von \mathfrak{B} zu addieren und mit $l \cdot v$ zu multiplizieren.

Man hat demnach den Mittelwert von \mathfrak{B} für eine Spulenseite zu berechnen und mit deren Anzahl und $l \cdot v$ zu multiplizieren.

Nehmen wir nun an, daß \mathfrak{B} , die Dichte des Kraftlinienfeldes, nach einer Sinusfunktion um den Anker herum sich ändert, so ist:

$$\mathfrak{B} = \mathfrak{B}_{\max} \cdot \sin \alpha \dots 15)$$

Hat die Spule die Breite b , und nehmen wir an, die Spulenmitte befinde sich über α , und b sei in Winkel ausgedrückt 2φ , so ist der mittlere Wert von \mathfrak{B} , die Größe $M(\mathfrak{B})$ gleich der Fläche $A B C D$

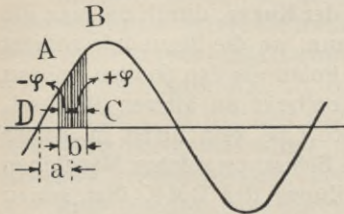


Fig. 93. Bestimmung des Spulenfaktors.

(Fig. 93) dividiert durch die Breite $b = 2\varphi$.

$M(\mathfrak{B})$ aber ist:

$$M(\mathfrak{B}) = \mathfrak{B}_{\max} \cdot \sin \alpha \cdot \frac{\sin \varphi}{\varphi} \dots 16)$$

und die im ganzen Anker induzierte EMK wird hiernach:

$$e = \mathfrak{B} \cdot \frac{\sin \varphi}{\varphi} \cdot l \cdot v \cdot m \dots 17)$$

Die Induktion geschieht also so, als ob das Feld nicht \mathfrak{B} , sondern $\mathfrak{B} \cdot \frac{\sin \varphi}{\varphi}$ wäre, sonst aber auch sinoidale Verteilung hätte; denn es ist: $\mathfrak{B} = \mathfrak{B}_{\max} \cdot \sin \alpha$. Die Größe $\frac{\sin \varphi}{\varphi} = f$ ist ein lediglich von der Spulenbreite abhängiger Faktor, den man den Spulenfaktor nennt.

Ist nun b gleich der Hälfte der Teilung (halber Abstand zweier Polmitten von gleichem Vorzeichen), so ist:

$$b = 180^\circ \quad \varphi = 90^\circ \quad f = \frac{\sin \varphi}{\varphi} = \frac{2}{\pi} = 0,637.$$

Ist dagegen b gleich $\frac{1}{3}$ der Teilung, so ist:

$$b = 120^\circ \quad \varphi = 60^\circ \quad f = \frac{\sin \varphi}{\varphi} = \frac{\frac{1}{2} \sqrt{3}}{\frac{\pi}{3}} = 0,827.$$

Ist b gleich $\frac{1}{4}$ der Teilung, so hat man:

$$b = 90^\circ \quad \varphi = 45^\circ \quad f = \frac{\sin \varphi}{\varphi} = \frac{\frac{1}{2} \sqrt{2}}{\frac{\pi}{4}} = 0,900.$$

Bei Drehstrommaschinen endlich hat im allgemeinen jede Spulenseite die Breite gleich $\frac{1}{6}$ einer Teilung, es ist somit:

$$b = 60 \quad \varphi = 30 \quad f = \frac{\sin \varphi}{\varphi} = \frac{\frac{1}{2}}{\frac{\pi}{6}} = 0,955.$$

Der Momentanwert der EMK der Ankerwicklung zur Zeit t ist somit:

$$e_t = \mathfrak{B}_{\max} \cdot \sin \alpha \cdot l \cdot v \cdot m \cdot f \dots 18)$$

Aus den Momentanwerten können nunmehr auf bekannte Weise die effektiven Werte berechnet werden; dadurch entstehen, indem man außerdem die von einem Pol ausgehende gesamte Kraftlinienzahl Φ einführt, die Koeffizienten k .

Für eine Anzahl von Fällen hat G. Kapp¹⁾ angegeben, in welcher Weise die Breite der Pole und Spulen und die Breite der Zwischenräume zwischen den Polen unter sonst gleichen Umständen den Betrag der effektiven EMK beeinflusst. Die Formel 11) (vergl. Kap. 11, Abschn. 9, S. 147) für die EMK der Maschine nimmt alsdann die Form an:

$$E = k \cdot \frac{p \cdot \Phi \cdot m \cdot u}{60} \cdot 10^{-8} \dots 19)$$

in der p die Polzahl, Φ die Anzahl der Kraftlinien eines Poles, m die Anzahl der wirksamen Ankerdrähte, u die Anzahl der Umdrehungen des Ankers in einer Minute bezeichnet. In dieser Formel bedeutet k einen Zahlenfaktor, der angibt, wievielmals die EMK der Wechselstrommaschine größer ist als die einer Gleichstrommaschine mit gleichem Felde, wenn in beiden Maschinen alle Ankerwindungen hintereinander geschaltet werden.

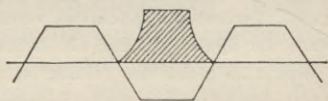


Fig. 94. Verlauf der EMK, wenn Spulenbreite und Polbreite gleich und der unbewickelte innere Kern halb so breit ist.

Um den Wert des Faktors k in Formel 19) zu ermitteln, hat Kapp eine größere Zahl von Fällen, zumal solche, die in der Praxis häufiger vorkommen, eingehend theoretisch untersucht und durch messende Versuche an ausgeführten Maschinen erprobt.

Wenn man z. B. die Breite der Spule l gleich der Polbreite, die Breite des inneren unbewickelten Kernes der Spule gleich der halben Polbreite macht, so entsteht eine aus oberhalb und unterhalb der Nulllinie gelegenen Trapezen zusammengesetzte Kurve der EMK. (Vergl. Fig. 94.) Die über dem mittleren Trapez gezeichnete schraffierte Figur zeigt in beliebigem Maßstabe den Verlauf der Größe e^2 , des Quadrates der Momentanwerte der EMK. Die Höhe eines flächengleichen Rechteckes würde die Größe e_{eff} , die mittlere effektive Spannung, darstellen.

¹⁾ Kapp, Dynamomaschinen für Gleich- und Wechselstrom, Berlin-München, Springer und Oldenbourg 1899, S. 311 u. f.

Wenn zwischen gleichsinnigen Polen gleich breite Zwischenräume ohne Kraftlinien liegen, Spule dicht an Spule liegt und alle Spulen hintereinander geschaltet sind, so ist die effektive EMK ungefähr 1,64 von der einer Gleichstrommaschine, welche eben so viele Pole besitzt, als hier Pole vorhanden sind, vorausgesetzt, daß die übrigen Abmessungen der Maschinen sowie die Feldstärke der Feldmagnete und die Zahl der wirksamen Ankerdrähte gleich ist.

Wenn man Pole entgegengesetzten Vorzeichens auf derselben Seite des Ankers miteinander abwechseln läßt, zwischen denen gleichbreite Räume ohne Kraftlinien gelegen sind, so ist es zweckmäßig die Spulenbreite gleich der doppelten Polbreite und die Dicke der Spulen gleich der halben Polbreite zu wählen.¹⁾ Unter solchen Umständen entsteht theoretisch eine durch schräge Linien gebildete, aus Dreiecken zusammengesetzte Kurve der EMK, und der effektive Wert der letzteren

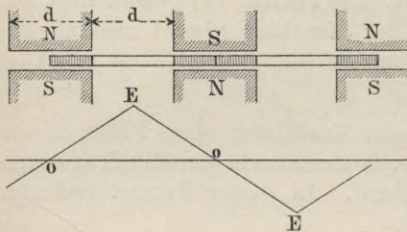


Fig. 95. Verlauf der Induktion, wenn die Dicke der Spule $\frac{1}{2} d$ und die Breite der Spule $2 d$ gleich der Teilung ist.

ist, wenn Spule dicht an Spule gereiht wird, so wie dies Fig. 95 zeigt, theoretisch 2,31 mal so groß als bei einer Gleichstrommaschine mit gleicher Polzahl, gleicher Zahl der wirksamen Ankerdrähte und gleicher Feldstärke.

Die spitzen Formen für die Spannungskurven sind weniger zweckmäßig, weil die vorübergehende, wesentliche Erhöhung

der EMK entsprechend höhere Ansprüche an die Isolation der Drähte stellt, die mittlere EMK jedoch durch solche hervorragende Spitzen nur wenig vergrößert wird. Um Kurven mit flachen Gipfeln und Tälern zu erzielen, macht man die Spulen etwas größer oder schmaler.

Bei dem Bau von Wechselstrommaschinen muß man immer Spulen von einer bestimmten endlichen Dicke verwenden, man kann daher die in den vorhergehenden Abschnitten 3 bis 8 dieses Kapitels entwickelten theoretischen Betrachtungen nur auf jede einzelne Windung anwenden und muß in Betracht ziehen, daß die in den einzelnen, nicht genau gleich großen Windungen der Spule induzierten EMKräfte sich addieren, wenn sie gleichgerichtet sind, dagegen subtrahiert werden müssen, wenn sie entgegengesetzte Richtung, aber gleiche Phase haben, und daß die resultierenden Spannungen nach Vektordiagrammen ermittelt werden müssen, wenn die Phasen verschieden sind. Es entstehen auf diese Weise verschiedenartige Kurven, die den Verlauf der EMK in verschiedenen Stellungen der Spule zu

¹⁾ Die älteren Maschinen von Siemens und von Ferranti besitzen ähnliche Anordnungen.

den Polen darstellen, und die Form dieser Kurven kann näherungsweise theoretisch aus der Polbreite, Spulenbreite und Spulendicke im voraus durch Rechnung ermittelt werden.

Es gibt jedoch auch noch andere Arten der Anordnung der Ankerwicklung, die für die Herstellung von Wechselstrommaschinen geeignet sind und praktische Anwendung finden; für diese aber muß eine andere Art der Betrachtung eintreten.

Denken wir uns z. B. wieder eine Anzahl abwechselnder Pole, an denen ein eiserner Kern vorüber geführt wird oder sich wenigstens in relativer Bewegung zu diesen Polen befindet. Alsdann schließen sich die Kraftlinien durch diesen Eisenkern von einem Pole zum nächsten, und man kann diesen Kern mit Spulen von verschiedener Breite umwickeln. Man kann die Verteilung der Kraftlinien in der Spule besser symmetrisch gestalten und größere Feldstärken erzielen, wenn man auf beiden Seiten des Kernes gleiche Pole sich gegenüber stehen läßt. Es ist ohne weiteres klar, daß diese Wechselstrommaschinen den vielpoligen Gleichstrommaschinen mit Ringanker ähneln. Die stärkste EMK wird in diesem Falle dann induziert werden, wenn die Mitte der Spule mit der Mitte eines Poles zusammenfällt, weil in dieser Gegend die meisten Kraftlinien aus den Polen in den Eisenkern eintreten und von den vorübergehenden Windungen der Spule so geschnitten werden, daß die EMKräfte sich summieren. Wenn die Spule weiter fortschreitet, vermindert sich die Zahl der geschnittenen Kraftlinien, und wenn die Spulenmitte mit der Mitte des zwischen zwei aufeinanderfolgenden Polen gelegenen, von Kraftlinien freien Raumes zusammenfällt, ist die von der Spule entwickelte EMK null. Befindet sich ein Teil der Windungen in dem Bereiche des einen, ein anderer Teil der Windungen derselben Spule im Bereiche des nächsten Poles, so werden entgegengesetzt gerichtete EMK induziert, die sich für die Wirkung nach außen subtrahieren, beziehentlich durch innere Ströme in der Spule ausgleichen.

Theoretisch wird in diesem Falle die EMK in den verschiedenen relativen Lagen zu den Polen durch eine aus schrägen Linien zusammengesetzte eckige Figur (vgl. Fig. 96¹⁾)

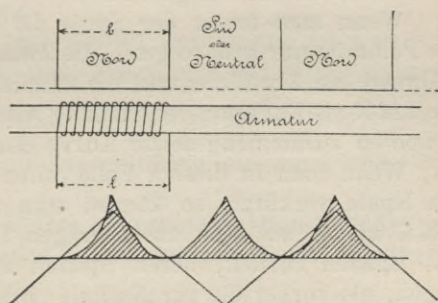


Fig. 96. Verlauf der Induktion in einer Wechselstrommaschine mit Ringanker.

¹⁾ Diese auf die Kappsche Wechselstrommaschine bezüglichen Abbildungen sind entnommen aus G. Kapp, Elektrische Wechselströme, deutsch von H. Kaufmann. Oskar Leiner, Leipzig.

dargestellt. Die Quadrate der EMKräfte in den einzelnen Momenten einer Halbperiode sind in dem schraffierten Stücke aufgetragen. Die Höhe des Rechteckes von gleicher Basis, welches mit der schraffierten Fläche gleichen Inhalt hat, ergibt die effektive EMK.

Wenn wir die Feldstärke der vorigen Anordnung beibehalten, Windungszahl und alle sonstigen Verhältnisse ungeändert lassen, aber die Polbreite nur halb so groß wählen wie vorher, so ist nur die halbe Polbreite von der Spule bedeckt, und die höchste EMK bleibt eine volle Viertelperiode hindurch ungeändert. Es entsteht dann eine Linie, durch welche der Verlauf der EMK dargestellt wird, die aus aneinanderstoßenden Trapezen besteht (vergl. Fig. 97). Es ist ohne weiteres ersichtlich, daß in diesem Falle die effektive EMK (die

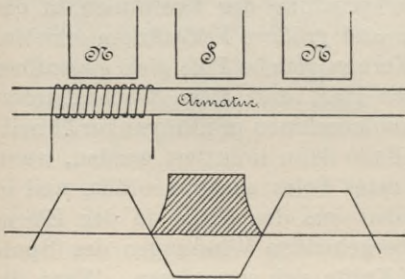


Fig. 97. Verlauf der Induktion, wenn nur die Polbreite und die Zwischenräume, nicht aber die Spule verkleinert werden.

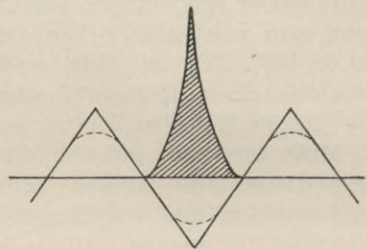


Fig. 98. Verlauf der Induktion, wenn im Falle der Fig. 97 auch die Spulenbreite verkleinert wird.

Quadratwurzel aus dem Inhalte der schraffierten Fläche) größer geworden ist als im vorigen Falle.

Wenn man ferner der Spule die ursprüngliche Größe gibt und die Polbreite nur halb so groß, die Zwischenräume noch kleiner macht, während die Kraftlinienzahl die nämliche bleibt, wie vorher, so wird die EMK als Funktion der Stellung wiederum durch eine aus einzelnen Trapezen zusammengesetzte Kurve dargestellt.

Wenn man in diesem Falle, ohne die Windungszahl zu ändern, die Spule verkürzt, so kommt man theoretisch für die Kurve der EMK wieder auf eine aus schrägen Linien zusammengesetzte Linie mit Spitzen zurück, deren Spitzen aber höher beziehentlich tiefer liegen, als vorher die zur Nulllinie parallelen Seiten der Trapeze, weil in der günstigsten Lage mehr Kraftlinien gleichzeitig von Windungen durchschnitten werden. (Vergl. Fig. 98.) Den Verlauf der Quadrate der Momentanwerte der EMK stellt die Begrenzung der schraffierten Kurve dar.

In Wirklichkeit zeigen, wegen der seitlichen Ausbreitung der Kraftlinienfelder, wegen der Selbstinduktion der Spulen und der

Rückwirkung der Spulen auf das Magnetfeld, die Kurven nirgends scharfe Spitzen und schroffe Änderungen, sondern die Übergänge sind überall allmähliche, sodaß Linien entstehen, die mehr oder weniger wirklichen Wellenlinien ähneln, wie wir das auch in der Fig. 98 durch die eingezeichnete gestrichelte Linie angedeutet finden.

Schreibt man die Formel für die in jeder Phase einer Wechselstrommaschine induzierte EMK:

$$E = k \cdot \omega \cdot \Phi \cdot Z \cdot 10^{-8} \dots \dots \dots 20)$$

so ist der Wert von k , wenn der Anker glatt ist und lange Spulen verwendet werden:

Spulenbreite durch Teilung	Polbreite durch Teilung				
	1	$\frac{4}{5}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{3}$
0	2,00	2,23	2,46	2,83	3,46
$\frac{1}{3}$	1,76	1,96	2,23	2,50	—
$\frac{1}{2}$	1,64	1,82	2,13	2,32	—
$\frac{2}{3}$	1,49	1,66	1,94	2,12	—
1	1,16	1,29	1,49	1,64	—
	Gleichpole			Wechselpole	

Enthält der Anker $3p$ gleichweit voneinander abstehende Nuten und ist Polbreite durch Teilung gleich $\frac{2}{3}$, so hat der Koeffizient k nach Görges folgende Werte:

- wenn alle Drähte einer Spule in einer Nute liegen: $k = 2,44$,
- wenn die Drähte auf zwei Nuten verteilt sind: $k = 2,12$,
- wenn die Drähte auf drei Nuten verteilt sind: $k = 1,63$.

Selbstverständlich sind immer die drei Nuten oder Löcher gemeint, die unter einem Feldpole liegen.

Für Einphasenmaschinen mit kleinen Zahnlücken ist $k = 2,22$.

Für Induktionsmaschinen und Maschinen der Mordeytype ist $k = 1,9$ und $\Phi = \frac{\Phi_0 - \Phi_1}{2}$ gleich der halben Differenz der Anzahl Kraftlinien, die übergehen, wenn eine Polfläche und wenn eine Lücke vor der Spule steht.

Weitere Werte von k für andere Ankerkonstruktionen findet man bei G. Kapp, Elektromechanische Konstruktionen (Berlin, Springer), 2. Aufl., S. 25 u. s. f.

12. Feldmagnetismus und Ankerrückwirkung.

In einer Wechselstrommaschine entsteht EMK infolge der relativen Bewegung der Ankerdrähte durch ein nahezu konstantes Magnetfeld, welches durch die Feldmagneten erzeugt wird.

Liefert die Maschine Strom, so wirken zwei verschiedene magneto-motorische Kräfte auf den Anker, der Feldmagnetismus und die

magnetische Kraft des Ankerstromes. Die erste Wirkung ist nahezu unveränderlich, die andere wechselt periodisch. Der resultierende Kraftlinienstrom induziert in den Ankerwindungen die EMK.

Bei offenem Stromkreise ist nur die Wirkung der Feldmagnete vorhanden, und die EMK erreicht ihren Höchstwert, wenn die Mitte der Ankerspule der Mitte zwischen zwei Feldmagneten gegenübersteht und somit keine Kraftlinien umfaßt. Zu diesem Höchstwerte verläuft die Kurve der EMK nahezu symmetrisch.

Ist zwischen EMK und Strom keine Phasenverschiebung vorhanden, so erreicht auch die Stromstärke ihren Höchstwert, wenn die Spulenmitte an der Mittellinie zwischen zwei aufeinanderfolgenden Polen vorübergeht. Der Ankerstrom veranlaßt dann weder eine Zunahme noch eine Abnahme des vom Felde erzeugten Gesamtstromes, er verzerrt jedoch das Feld insofern, als er die in der Bewegungsrichtung vorausliegende Polspitze stärker magnetisiert, die nachfolgende Polspitze um gleichviel entmagnetisiert. (Vergl. Gleichstromtechnik Kap. XIX, 4., S. 367.)

Jede Wechselstrommaschine besitzt aber schon an und für sich naturgemäß eine nicht unerhebliche Selbstinduktion, da Spulen, zu meist auch solche mit Eisen, im Innern vorhanden sind. Schon aus diesem Grunde, ganz abgesehen davon, daß in den meisten Wechselstromkreisen durch eingeschaltete Transformatoren, Elektromotoren, Bogenlampen und deren Drosselspulen erhebliche Beträge von Selbstinduktion vorhanden sind, muß eine erhebliche Verzögerung der Phase der Wellenlinie des Stromes gegen die Wellenlinie der EMK eintreten. Der Strom erreicht daher sein Maximum später als die EMK, zu einer Zeit, zu der die Ankerspule bereits dem nächsten Feldpole zum Teil gegenübersteht.

Denken wir uns nun, eine Ankerspule *s* bewege sich vor den Feldmagneten I und II vorüber (vergl. Fig. 99), so empfängt sie

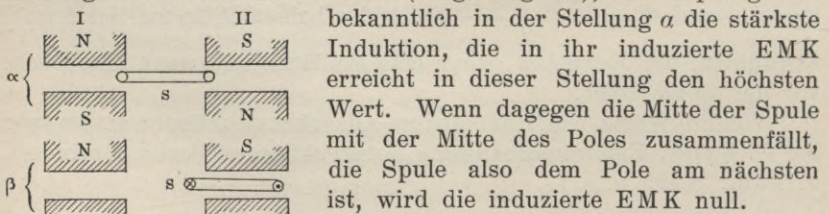


Fig. 99. Veranschaulichung der Rückwirkung des Ankers auf das Magnetfeld.

bekanntlich in der Stellung α die stärkste Induktion, die in ihr induzierte EMK erreicht in dieser Stellung den höchsten Wert. Wenn dagegen die Mitte der Spule mit der Mitte des Poles zusammenfällt, die Spule also dem Pole am nächsten ist, wird die induzierte EMK null.

Wenn aber infolge der Selbstinduktion der Strom sein Maximum erst später erreicht (vergl. Kap. 2, 1., S. 21 u. f.), so wird z. B. die Spule schon etwa in die Stellung β gekommen sein, wenn erst der Strom infolge der Phasendifferenz seinen höchsten Wert annimmt. In dieser Lage β aber sind die in der Spule durch

den Strom erzeugten Kraftlinien denen des Feldes II entgegengesetzt, sie werden also einen Teil der Kraftlinien dieses Feldes vernichten, das Feld in seiner Gesamtheit schwächen; anderseits wird eine ungleiche Verteilung der Kraftlinien innerhalb des Poles veranlaßt werden. In dem hier gezeichneten Falle β würde z. B. der links gelegene Teil des Poles II schwächer werden als der rechte Teil.

Nun wäre aber auch der Fall denkbar, daß eine sehr bedeutende Kapazität im Stromkreise oder eine ähnlich wirkende Ursache vorhanden wäre; diese veranlaßt bekanntlich ein Voreilen der Welle des Stromes vor der Welle der EMK, verursacht also eine negative Phasenverschiebung (vergl. Kap. 3, 1., S. 50). Dergleichen Fälle werden nicht sehr häufig vorkommen; es könnte aber doch ähnliches stattfinden, wenn z. B. eine Wechselstrommaschine, deren Anker sehr geringe Selbstinduktion hätte, durch ein viele Meilen langes konzentrisches Kabel auf einen induktionslosen Widerstand (Glühlampen) arbeitete, sodaß die Kapazität im Stromkreise größer wäre als die Selbstinduktion. In einem solchen Falle würde der Strom schon sein Maximum erreichen, während sich die Spule s noch im Bereiche des vorhergehenden entgegengesetzten Poles befindet. Dieser würde dann durch die Rückwirkung der Spule eine Verstärkung erfahren, weil seine durch die Erregerwindungen erzeugten Kraftlinien und die von dem Strome der Spule erzeugten Kraftlinien gleichgerichtet wären.

Man erkennt aus dieser Betrachtung, daß das Magnetfeld bei einer positiven Phasenverschiebung, wenn infolge eines Überwiegens der Selbstinduktion der Strom hinter der EMK zurückbleibt, durch die Rückwirkung des Ankers eine Schwächung erleidet, daß aber im Falle einer negativen Phasenverschiebung, wenn die Kapazität im Stromkreise überwiegt, das Magnetfeld wegen der Voreilung des Stromes vor der EMK durch die Ankerrückwirkung eine Verstärkung erfährt.

Durch die Selbstinduktion erfährt bekanntlich außerdem, ähnlich wie durch den Widerstand, der von der Maschine erzeugte Strom eine Verringerung, weil sie den scheinbaren Widerstand, die Impedanz des Leiters, vergrößert; anderseits wird aber auch durch die erzeugte Phasendifferenz das Magnetfeld geschwächt, beide Gründe veranlassen somit eine Verminderung der vom Anker erzeugten EMK und des Stromes.

Der Vollständigkeit wegen muß übrigens noch hinzugefügt werden, daß das aus Feldmagnetismus und Ankerrückwirkung resultierende Feld in den Ankerwindungen nicht die Klemmenspannung selbst induziert. Neben der vom resultierenden Felde induzierten EMK tritt infolge der Selbstinduktion des Ankers noch die dadurch erzeugte

EMK hinzu, und außerdem verzehrt der Ohmsche Widerstand der Ankerwicklung einen Teil der erzeugten Spannung. Die durch Selbstinduktion erzeugte EMK ist um 90° hinter dem Strom in der Phase zurück. War der Strom nun ohnehin schon gegen die EMK in der Phase zurück, so ist dann die EMK der Selbstinduktion um mehr als 90° hinter der Spannung zurück und wird dann vermindern auf die Klemmenspannung einwirken.

Eilte jedoch der erzeugte Strom der Spannung voraus, so ist die EMK der Selbstinduktion dann um weniger als 90° hinter der im Anker vom Felde induzierten EMK zurück, und das Zusammenwirken beider EMKräfte wird eine Vermehrung der Klemmenspannung zur Folge haben.

Diese Tatsachen waren Veranlassung, daß man lange Zeit die Selbstinduktion des Ankers möglichst groß machte. Bei Kurzschluß wurde bei solchen Maschinen die Ankerrückwirkung so stark, daß die Stromstärke nur eine mäßige Höhe erreichte, durch die eine Beschädigung der Wickelung nicht zu befürchten war. Dazu kam, daß man glaubte, Wechselstrommaschinen mit großer Selbstinduktion ließen sich leichter in Parallelschaltung gebrauchen als Maschinen mit geringer Selbstinduktion.

Durch praktische Versuche Mordeys ist jedoch nachgewiesen worden, daß die Größe der Selbstinduktion für den Synchronismus parallel geschalteter Wechselstrommaschinen von geringer Bedeutung ist.

Neuerdings baut man daher die Wechselstrommaschinen mit geringer Selbstinduktion, sodaß bei induktionsloser Belastung durch Glühlampen der störende Spannungsabfall zwischen Leerlauf und Vollbelastung nicht mehr als 4 bis 5 % beträgt. Bei ausschließlicher Belastung durch Motoren beträgt dann der Spannungsabfall noch immer unter Umständen 15 bis 20 %.

Die Selbstinduktion des Ankers einer Wechselstrommaschine ist der Anzahl der Kraftlinien, dem Quadrate der Zahl der Windungen und der Anzahl der Polwechsel in der Zeiteinheit proportional; die Anzahl der Kraftlinien ist aber angenähert der Stromstärke und der Windungszahl proportional und hängt außerdem von der Permeabilität der Substanzen ab, in denen die Kraftlinien verlaufen.

Wollten wir die Selbstinduktion verringern, so müßten wir nur wenige Windungen auf den Anker anbringen; um dann noch dieselbe EMK zu induzieren, müßten wir viel stärkere Felder anwenden. Außerdem könnte man, um die Selbstinduktion herabzusetzen, mit niedriger Wechselzahl arbeiten; das letztere ist aber oft nicht möglich, weil, wenn die Frequenz unter 40 in der Sekunde herabgeht, das Licht von Glühlampen mit dünnen Kohlenfäden und das der Bogenlampen zu flimmern anfängt. Auch die Verminderung der Permeabi-

lität ist nicht ratsam, weil die Kraftlinien der Feldmagnete auch durch das Medium, das die Spulen ausfüllt, hindurch gehen müssen, und man den Erregerstrom sehr steigern muß, wenn der Widerstand des magnetischen Stromkreises vergrößert wird.

Zur Verkleinerung der Selbstinduktion des Ankers einer Wechselstrommaschine bleiben daher nur die Verminderung der Zahl der Windungen und die Erhöhung der Feldstärke als Ausweg. Beides läßt sich nur durch Vergrößerung der Querschnitte der Maschine und Erhöhung der Kosten der Herstellung erreichen.

Da es aber außerdem eine große Zahl von Fällen gibt, für die eine gewisse Selbstinduktion nicht sonderlich schädlich ist, so baut man in der Praxis die Maschinen lieber kleiner und billiger und nimmt ein gewisses Maß von Selbstinduktion mit in den Kauf.

Da aber sowohl die Selbstinduktion als bei positiver Phasenverschiebung die Ankerrückwirkung mit der Stromstärke wächst, so nimmt bei gleichbleibender Erregung der Feldmagnete mit zunehmender Stromstärke die vom Anker entwickelte EMK ab, und dies um so mehr, je größer die Selbstinduktion des Ankers ist.

Für gewöhnlich wird dieser Spannungsabfall dadurch ausgeglichen, daß man den Erregerstrom, der die Windungen der Feldmagnete umfließt, verstärkt. Um dies ausführen zu können, legt man in den Stromkreis der Stromquelle, die den Erregerstrom liefert, einen Regulierwiderstand. Will man den Erregerstrom verstärken, so schaltet man einen Teil des Widerstandes aus.

Da aber ein solches Regulieren durch die Hand oder durch eine selbsttätige Vorrichtung auch gewisse Nachteile hat, so wird, um diesem Übelstande zu begegnen, bei manchen Maschinen ein konstanter Bruchteil des Ankerstromes kommutiert und als intermittierender Gleichstrom in demselben Sinne um die Feldmagnete herumgeführt, wie der sonst zur Erregung dienende Gleichstrom. Bei passender Wahl der Verhältnisse kann man es dahin bringen, daß die Erregung der Feldmagnete in demselben Maße wächst, wie die Spannung durch die Selbstinduktion und die Ankerrückwirkung bei wachsender Ankerstromstärke abnimmt. Solche Wechselstrommaschinen zeigen dann bei verschiedener Belastung gleiche Klemmenspannung; sie führen den Namen Gleichspannungsmaschinen, Maschinen mit gemischter Erregung oder Compoundmaschinen.

Anmerkung. Die umstehende Fig. 100 erläutert in schematischer Darstellung die Einrichtung einer solchen Wechselstrommaschine mit gemischter Wickelung. Die rechts abgebildete kleine Gleichstrommaschine D, deren Feldstärke durch einen kleinen Nebenschlußregulator W geregelt werden kann, sendet den erzeugten Strom durch einen Regulierwiderstand in zahlreichen Windungen (mit dünnen Linien gezeichnet) um die Feldmagnete M der Wechselstrommaschine und bringt Pole von wechselnden Vorzeichen hervor. Die Spulen $C_1 C_1 C_1$ des

rotierenden Ankers A erzeugen Wechselstrom, der zu den auf der Ankerachse befestigten Schleifringen RR₁ und von da zu einem ebenfalls auf der Ankerachse angebrachten Kommutator C geht. Während auf den Schleifringen RR₁ Schleifedern ruhen, die den Wechselstrom nach außen in die Hauptleitung abführen, sind die Bürsten BB des Kommutators, die intermittierenden Gleichstrom empfangen, durch einen Nebenschluß von hohem Widerstande miteinander verbunden, um die Funkenbildung zu vermindern. Der kommutierte Gleichstrom wird nun ebenfalls in einigen Windungen (dicke Linien) in passender Richtung um die Elektromagnete geführt. Da diese Windungen einen Nebenschluß von konstantem Widerstande zum

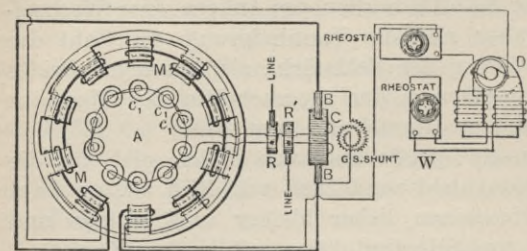


Fig. 100. Schematische Darstellung einer Wechselstrommaschine mit gemischter Erregung.

wird nun ebenfalls in einigen Windungen (dicke Linien) in passender Richtung um die Elektromagnete geführt. Da diese Windungen einen Nebenschluß von konstantem Widerstande zum

Anker bilden, wird ein bestimmter Bruchteil des Ankerstromes um die Feldmagnete geführt. Bei stärkerem Ankerstrom wird auf diese Weise der die Feldmagnete erregende Strom verstärkt und dadurch eine stärkere Induktion in den Ankerspulen verursacht. Die Phasenverschiebung zwischen EMK und Strom wird aber dadurch nicht völlig beseitigt werden.

Bei Maschinen, die mit wenig veränderlicher Stromstärke arbeiten, versieht man die Feldmagnete von Anfang an mit einer etwas stärkeren Bewickelung, um die Ankerrückwirkung auszugleichen.

13. Die Größe des Selbstinduktionskoeffizienten eines Ankers.

Die Selbstinduktion des Ankers einer Wechselstrommaschine ist eine veränderliche Größe; selbst der sogenannte Selbstinduktionskoeffizient L ist je nach der Kraftliniendichte, zumal wenn sich Eisen im Anker befindet, und nach der Stellung, die der Anker im Felde einnimmt, etwas verschieden.

Bezeichnet man mit f die Feldstärke, die durch einen Strom von 1 absoluten Stromeinheit (= 10 Ampère) in einer Windung des Ankers erzeugt wird und mit Z die Anzahl der Windungen einer Spule, so ist

$$L = Z^2 \cdot f \dots \dots \dots 21)$$

der Selbstinduktionskoeffizient dieser Spule. Enthält der Anker 2p Spulen, so ist der Selbstinduktionskoeffizient des Ankers

$$L = 2p Z^2 f \dots \dots \dots 22)$$

Um diesen Selbstinduktionskoeffizienten L einer Maschine zu messen, senden wir einen Wechselstrom, der dem von der Maschine zu liefernden an Stärke und Wechselzahl gleich ist, durch den ruhenden Anker, während die Feldmagnete normal erregt sind, und messen den Spannungsunterschied E an den Ankerklemmen, die Stromstärke J und den Ohmschen Widerstand w des Ankers.

Da nun die Formel gilt:

$$J = \frac{E}{\sqrt{W^2 + \omega^2 \cdot L^2}} \dots \dots \dots 23)$$

so kann, da alle Größen außer L bekannt sind, der für die herrschende Stromstärke gültige Wert von L angenähert berechnet werden.¹⁾

Wenn die Kurvenform der EMK und des Stromes nahezu sinoidal ist, kann man L auch dadurch bestimmen, daß man die Maschinen auf einen induktions- und kapazitätsfreien Widerstand W (Glühlampen) arbeiten läßt und E_{eff} und J_{eff} mit einwandfreien Instrumenten (Hitzdrahtinstrumenten, Dynamometern) mißt. Alsdann ist:

$$J_{\text{eff}} = \frac{E_{\text{eff}}}{\sqrt{(W + W)^2 + \omega^2 L^2}}$$

daraus findet man:

$$L = \frac{1}{\omega \cdot J_{\text{eff}}} \cdot \sqrt{E_{\text{eff}}^2 - J_{\text{eff}}^2 (W + W)^2} \dots \dots \dots 24)$$

In der Praxis herrscht bei weitem der Fall vor, daß die Selbstinduktion der Maschine und die induktive Rückwirkung der Belastung die entgegengesetzte Wirkung im Stromkreis auftretender Kapazitäten weitaus überwiegt. Dann ist der Strom hinter der EMK in der Phase zurück. Bei rein sinoidaler Form der Kurven der EMK und der Stromstärke wäre dann die Leistung der Maschine a_{eff}

$$a_{\text{eff}} = E_{\text{eff}} \cdot J_{\text{eff}} \cos \varphi$$

wobei φ den Winkel der Phasenverschiebung bedeutet.

Da aber die Stromkurven der Wechselstrommaschinen, zumal wenn Eisen in den Spulen vorhanden ist, meist erheblich von der Sinusform abweichen, so kann von einem bestimmten Phasenverschiebungswinkel φ nicht mehr die Rede sein, und an die Stelle von $\cos \varphi$ tritt der Leistungsfaktor A, sodaß A durch die Gleichung:

$$A = \frac{a_{\text{eff}}}{E_{\text{eff}} \cdot J_{\text{eff}}}$$

definiert wird, wenn man a_{eff} mit dem Wattmeter und E_{eff} und J_{eff} mit Dynamometern oder Hitzdrahtinstrumenten mißt.

Zeichnet man für eine Wechselstrommaschine für eine volle Periode die Kurven der Klemmenspannung e_t , der Stromstärke i_t und bildet das Produkt $e_t \cdot i_t$ (vergl. Fig. 101) so zeigt sich, daß die Selbstinduktion auf die Tätigkeit der Maschine eine ähnliche Wirkung ausübt, wie etwa ein Schwungrad auf eine Dampfmaschine oder einen Gasmotor. Das Schwungrad absorbiert während der Arbeitsperiode des Kolbens einen Teil der geleisteten Arbeit und gibt diese Arbeit wieder ab, während der Dampfdruck nicht wirkt.

¹⁾ $\omega = 2 \pi \sim$, wenn \sim die Frequenz ist (vgl. Kap. 2, 1, Form. 15, S. 25).

Bei der Wechselstrommaschine wird, während Strom und Spannung gleichsinnig wachsen oder abnehmen, ein Teil der erzeugten Energie dazu verwendet ein magnetisches Feld in der Umgebung der Leiter herzustellen; während der Strom dann abnimmt, wird dieser Teil aufgespeicherter Energie wieder abgegeben. Der negative Teil der schraffierten Arbeitsfläche (Fig. 101) wird dabei von der Maschine selbst geliefert.

Sind Strom und Spannung in Quadratur, so sind (vergl. Fig. 13, S. 19) die positiven und negativen Flächen, die von der Arbeitskurve eingeschlossen werden, einander gleich, die in der einen halben Periode aufgewendete Arbeit wird in der folgenden Halbperiode völlig zurückgegeben.

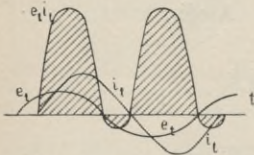


Fig. 101. Verteilung der Arbeitsleistung eines Wechselstromes auf die Dauer einer Periode.

Die Wechselstrommaschinen bieten daher dem sie antreibenden Motor einen periodisch veränderlichen Widerstand dar; dies gibt zu einer zitternden Bewegung Anlaß. Diese zitternde Bewegung und die periodische

Änderung der Lagerung der Eisenmolekeln in den Kernen des von Wechselstrom umflossenen Elektromagneten infolge der Ummagnetisierung, die mit kleinen Längenänderungen dieser Kerne verknüpft sind, bilden zusammen die Ursache des unliebsamen, brummenden Geräusches, welches in Tätigkeit begriffene Wechselstrommaschinen fast ausnahmslos hören lassen.

Der Maximalwert der durch die Selbstinduktion verursachten EMK ist bekanntlich $\omega L J_{\max}$. Hierin ist aber der Selbstinduktionskoeffizient L , wie schon mehrfach erwähnt, keine Konstante, weil die Permeabilität des Eisens veränderlich ist, und weil die Länge der Kraftlinienwege bei verschiedenen Stellungen der induzierten Spulen zu den Feldpolen verschieden ist. — Mordey hat diese Unterschiede gemessen und gefunden, daß sie 14% des Maximalwertes nicht übersteigen. Man erkennt aber aus diesen Überlegungen, daß der Zusammenhang zwischen den Momentanwerten der Stromstärke i_t und den Momentanwerten der induzierten EMK e_t in Wirklichkeit sehr verwickelt ist.

Um die mehrfach schädliche Wirkung der Selbstinduktion der Wechselstrommaschinen zu kompensieren, um Strom und Spannung in gleiche Phase zu bringen, den Leistungsfaktor A möglichst der Einheit gleich zu machen, hat man vielfach daran gedacht Kondensatoren in einen Nebenschluß zu den Maschinenklemmen zu legen.

Leider werden aber solche Kondensatoren ziemlich kostspielig und widerstehen nicht lange der Einwirkung hoher Wechselstromspannungen.

Hutin und Le Blanc verwendeten Kondensatoren aus Zinnfolie, die durch sorgfältig getrocknetes und paraffiniertes Papier voneinander isoliert waren. Solche Kondensatoren aber erhitzen sich stark, fangen nach einiger Zeit an einen Ton von wachsender Stärke zu geben, bis schließlich Zerstörung eintritt.

Die Stanley Electric Co. verwendet getrocknetes Papier mit Wachs getränkt. Swineburne imprägniert vollkommen trockenes Papier mit heißem Öl und schließt den Kondensator in ein nahezu vollkommenes Vakuum ein.

Alle diese Versuche haben noch zu keinen Ergebnissen geführt, die für die Praxis genügende Betriebssicherheit besäßen. Glimmerkondensatoren von großer Kapazität würden vermutlich eine längere Lebensdauer haben, sie sind aber leider zu kostspielig.

Die Erwärmung der Kondensatoren wird veranlaßt durch eine elektrostatische Hysteresis des isolierenden Zwischenmittels und veranlaßt bei hohen Periodenzahlen einen Energieverlust von mehreren Prozenten.

14. Vorausbestimmung des Spannungsabfalles einer Wechselstrommaschine durch die Belastung.¹⁾

Bei gleichbleibender Erregung und gegebener Phasenverschiebung zwischen Klemmenspannung und Strom hängt der Spannungsabfall einer Wechselstrommaschine nur von der Ankerrückwirkung, der Ankerstreuung und dem Ankerwiderstand ab.

Ankerrückwirkung und Ankerstreuung können aber aus den Abmessungen der Maschine nur unvollkommen und nur durch sehr verwickelte und unzuverlässige Rechnungen ermittelt werden.

Da man es meist mit Maschinen gleicher grundsätzlicher Bauart (gleicher Type) zu tun hat, so genügen, wie Behn-Eschenburg und E. Arnold gezeigt haben, eine Anzahl einfacher, mit wenig Mitteln anzustellender Versuche, um den Einfluß der Ankerrückwirkung und der Streuung mit einer für praktische Bedürfnisse vollständig ausreichenden Genauigkeit voraus zu bestimmen.

Man stellt zunächst die sogenannte Leerlaufcharakteristik E'_a der Maschine auf, d. h. man bestimmt bei offenen Klemmen und stromlosem Anker für die vorgeschriebene Umdrehungszahl die Klemmenspannung in ihrer Abhängigkeit von der Ampèrewindungszahl der Erregung. Die Gestalt einer solchen Charakteristik zeigt die oberste Kurve in Fig. 102. Hierauf wird die Kurzschlußkurve bestimmt, d. h. die Stromstärke im Anker in ihrer Abhängigkeit von der Ampèrewindungszahl der Felderregung gemessen, wenn der Anker lediglich durch

¹⁾ Nach E. Arnold, ETZ 1896, S. 730 u. s. f.

Die wirkliche Kurzschlußkurve K ist auch sehr nahe eine Gerade, sie wird aber infolge der Streuung etwas tiefer liegen. Nimmt die Streuung stärker zu als die Stromstärke, so senkt sich im weiteren Verlauf die Kurzschlußkurve etwas stärker. Bei Maschinen unipolarer Bauart, die mit sehr hoher Sättigung arbeiten, kommt es aber auch vor, daß die Kurve sich für stärkere Erregungen etwas nach oben biegt.

Bezeichnen wir die Ordinaten der wirklichen Kurzschlußkurve mit J_0 , so ist:

$$J_0 = \frac{J'_0}{k} \dots \dots \dots 25)$$

und k ein nur wenig von der Einheit verschiedener Koeffizient, durch den die Streuung der Maschine charakterisiert wird. Der Wert von k ist für Maschinen gleicher relativer Bauart derselbe, kann daher als bekannt angesehen werden.

Für eine bestimmte Stromstärke J der Maschine ist die rückwirkende Ankerampèrewindungszahl des Ankers¹⁾

$$= k \cdot \text{Windungszahl des Ankers} \cdot J.$$

Für diese Stromstärke J und eine beliebig gegebene Phasenverschiebung φ des Stromes gegen die Klemmenspannung kann dann die Abhängigkeit der Klemmenspannung von der Erregung auf folgende Weise bestimmt werden.

Wir tragen in Fig. 102 $J = OB_1$ im Maßstabe der Ampère in der Ordinatenrichtung auf und bestimmen durch $B_1 B_2$ auf der als Geraden betrachteten Kurzschlußkurve den dazu gehörigen Punkt B_2 , so ist $B_1 B_2 = OP = AW'_f$.

Wir tragen nun in Fig. 105 unter Winkel α ($= 87^\circ$) gegen die Abszissenachse DX diese Größe $DA = B_1 B_2 = AW'_f$ auf und ziehen $OA \parallel DX$. Dann ist $DO =$ Anzahl der Ankerampèrewindungen. Da α sehr nahe 90° ist, ist sichtlich sehr nahe $DO = DA = AW'_f$.

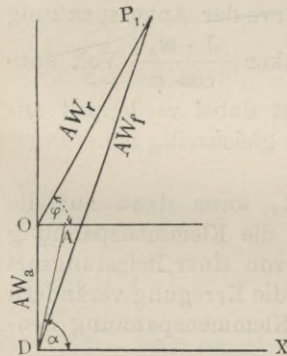


Fig. 105. Konstruktion der resultierenden Ampèrewindungen.

Wir machen nun $\sphericalangle P_1OA = \varphi$ gleich der gegebenen Phasenverschiebung und schlagen mit der Ampèrewindungszahl des Feldes AW_f von D aus einen Kreisbogen, machen also $DP_1 = AW_f$, so ist $OP_1 = AW_r$ die resultierende Ampèrewindungszahl.

¹⁾ Für Wechselstrommaschinen ist $W_a = \sqrt{2} \cdot W$ und für Drehstrommaschinen $W_a = 0,5 \sqrt{2} \cdot W$. Für multipolare Maschinen mit p Polpaaren, mit einer Erregerspule von W_e Windungen, die vom Erregerstrom J_e durchflossen wird, ist die Zahl der Feldampèrewindungen $AW_f = p \cdot W_e \cdot J_e$ und für unipolare Maschinen $AW_f = 2 p W_e \cdot J_e$.

Trägt man nun OP_1 als Abszisse in Fig. 102 ein, so ist $P_1P_3 = E_a$. Zieht man nun parallel der Abszissenachse herüber, bis die über AW_f in P_2 errichtete Ordinate in P_4 geschnitten wird, so ist P_4 ein Punkt der gesuchten E_k Kurve, der wirklichen Spannungskurve.

Man kann auf diese Weise für eine bestimmte Phasenverschiebung φ beliebig viele Punkte der E_k Kurve bestimmen.

Wählen wir $AW_f = AW'_f = OP$, so ist $AW_a = 0$ und $E_a = 0$. P ist somit ein Punkt, der allen für verschiedene φ konstruierten E_a Kurven gemeinsam ist.

Das in Fig. 102 gezeichnete Diagramm bezieht sich z. B. auf eine 132 Kilowatt-Maschine, die für normal 3300 Volt bei 40 Ampère und 53 Perioden bestimmt war, 16 Pole hatte ($p = 8$) und mit 400 ($u = 400$) Umdrehungen in der Minute umlief.

Die totale Windungszahl des Ankers $W_a = 400$. Ferner war die Windungszahl der Erregerspule $W_e = 950$. Die Ankerbohrung betrug 1330 mm, der Feldmagnetdurchmesser 1320 mm, die Eisenbreite des Ankers 345 mm, der Widerstand der Ankerwicklung = 0,56 Ohm.

Die Leerlaufkurve kann aus den Abmessungen der Maschine vorher berechnet werden.¹⁾ Die Klemmenspannung der E_k Kurven erhält man, indem man von den Ordinaten der E_a Kurve der Ankerspannung etwa zweimal den Spannungsverlust im Anker $\frac{J \cdot W_a}{\cos \varphi}$ Volt subtrahiert. Der Spannungsverlust im Anker ist dabei verdoppelt angesetzt, um den Verlusten durch Wirbelströme gleichzeitig näherungsweise mit Rechnung zu tragen.

Ausgehend von dieser Leerlaufkurve E_a kann dann auf die angegebene Weise bestimmt werden, wie sich die Klemmenspannung bei konstanter Erregung ändert, wenn man von einer Belastungsart zur anderen übergeht, oder um wie viel man die Erregung verändern muß, wenn bei verschiedener Belastung die Klemmenspannung denselben Wert haben soll.

Für die betrachtete Maschine beträgt z. B. bei induktionsfreier Belastung mit der normalen Stromstärke $J = 40$ Ampère der Spannungsabfall bei konstanter Erregung $P_5O = 130$ Volt oder 4,2%. Werden die 40 Ampère Ankerstromstärke erreicht bei induktiver Belastung, sodaß $\cos \varphi = 0,8$ ist, so beträgt der Spannungsabfall

$$P_5P_4 = 540 \text{ Volt} = 15,7\%$$

Die Normalspannung von 3300 Volt gibt die Maschine bei Leerlauf bei einer Erregung mit 6,2 Ampère, bei induktionsfreier Belastung mit 40 Ampère bei einer Erregung mit 6,9 Ampère, und bei gleicher

¹⁾ Vergl. Gleichstromtechnik. Kap. XX, 6, S. 409.

induktiver Belastung, sodaß $\cos \varphi = 0,8$ ist, erst bei einer Erregung mit 8,5 Ampère.

Beobachtete und auf die angegebene Weise ermittelte Werte haben vollständige Übereinstimmung ergeben.

15. Gang der Berechnung von Wechselstrommaschinen nach E. Arnold.¹⁾

Solange die Charakteristik einer Maschine geradlinig verläuft, hängt der Spannungsabfall nur von dem Verhältnis der Anzahl der Feldampèrewindungen zu der Anzahl der Ankerampèrewindungen, also von der Größe des Quotienten $\frac{AW_f}{AW_a}$ ab. Abgesehen von den Feldampèrewindungen, die zur Überwindung des Luftzwischenraumes δ nötig sind, braucht man für alle Größen derselben Maschinentype ungefähr dieselbe Ampèrewindungszahl für jeden Pol. Man kann daher in dem angegebenen Quotienten die Ampèrewindungszahl für den Luftraum, die ja erfahrungsmäßig immer den weitaus größten Teil ausmacht, allein einsetzen. Bei Wechselstrommaschinen ist $AW_a = J \cdot m$ und für Drehstrommaschinen $AW_a = 1,5 \sqrt{2} \cdot J \cdot m$, wenn J die höchste effektive Ankerstromstärke und m die Windungszahl pro Phase des Ankers bedeutet.

Bezeichnet \mathfrak{B}_g die Kraftliniendichte im Luftraume (die Luftinduktion) und p die Zahl der Polpaare, so ist:

$$AW_f = 2 p 0,8 \cdot \delta \cdot \mathfrak{B}_g \dots \dots \dots 26)$$

oder wenn man mit $AW_p = \frac{AW_a}{2 p}$ die Anzahl der Ampèrewindungen für

jeden Pol bezeichnet $\frac{AW_f}{AW_a} = \frac{0,8 \delta \mathfrak{B}_g}{AW_p} \dots \dots \dots 27)$

Der Luftzwischenraum δ darf im allgemeinen nicht zu groß gewählt werden, weil sonst AW_f zu groß wird und sich dann die Streuung des Magnetfeldes störend geltend macht.

Für Maschinen gleicher grundsätzlicher Bauart hat zumeist \mathfrak{B}_g nahezu denselben Wert, man kann daher eine Annahme für $AW_p = \frac{AW_a}{2 p}$ als Ausgangspunkt für die Berechnung wählen.

Die Summe der Polbögen $2 p b$ beträgt nun bei multipolar gebauten Maschinen ungefähr $\frac{3}{4}$ und bei unipolaren Maschinen $\frac{1}{2}$ des

¹⁾ ETZ 1896, S. 776.

Umfanges. Als Maß kann daher die Zahl der Ampèrewindungen für 1 *cm* Umfang die Größe AW_u

$$AW_u = \frac{AW_a}{\pi D} \dots \dots \dots 28)$$

gewählt werden, wenn *D* den Ankerdurchmesser in *cm* bezeichnet.

Für eine Anzahl guter multipolarer Wechselstrommaschinen verschiedener Leistung haben nun die in Frage kommenden Größen folgende Zahlenwerte:

Leistung der Maschine in KW	Spannung in Volt	Stromstärke in Ampère	Umdrehungen in 1 Minute	Polzahl 2 p	Wechselzahl ~	AW_p	AW_u	$\frac{0,8 \mathfrak{B}_g \cdot \delta}{AW_p}$
30	1000	30	600	10	50	960	40,3	1,95
66	2000	33	560	14	65	990	50,2	2,16
132	3300	40	400	16	53	1000	38,4	2,40
200	2000	100	175	36	52,5	1000	45,8	2,95

Für die meisten modernen Maschinen liegt die Umfangsgeschwindigkeit *v* des rotierenden Teiles zwischen 20 und 30 $\frac{\text{met}}{\text{sek}}$. Nur wenn der umlaufende Teil keine Wickelung trägt, kann man bis 40 $\frac{\text{met}}{\text{sek}}$ hinaufgehen.

Ist *v* und die Periodenzahl ~ vorgeschrieben, wie dies meist der Fall ist, so ergibt sich die Umdrehungszahl *u* gleich:

$$u = \frac{60 \sim}{p} \dots \dots \dots 29)$$

Auch die Polzahl *p* wird man als gegeben durch die Verhältnisse, beziehentlich durch den Vergleich mit anderen Maschinen ähnlicher Einrichtung und Leistung ansehen können.

Es gilt nun, den Durchmesser des Ankers zu bestimmen, für den die Beziehung gilt:

$$D = \frac{v \cdot p}{\pi \cdot \sim} \dots \dots \dots 30)$$

Die Wattleistung der Maschine *A* ist nun:

$$A = J \cdot E \cdot \cos \varphi,$$

demnach:

$$AW_u = \frac{J \cdot m}{\pi \cdot D} = \frac{A \cdot m}{\pi \cdot D \cdot E \cdot \cos \varphi} \quad 1)$$

und daraus folgt:

$$m = \frac{\pi \cdot \cos \varphi \cdot D \cdot E}{A} \cdot AW_u \dots \dots \dots 31)$$

Damit ist die Windungszahl (bei Drehstrommaschinen die Windungszahl für jede Phase) bestimmt und kann auf einen Wert ab-

1) Bei Drehstrommaschinen ist $AW_u = 1,5 \sqrt{2} \cdot \frac{J \cdot m}{\pi \cdot D}$.

gerundet werden, der eine bequeme Teilung durch die Spulenzahl möglich macht.

Hat man noch den Querschnitt der Bewickelung berechnet, ähnlich wie dies schon bei der Berechnung der Gleichstrommaschinen (Gleichstromtechnik Kap. XXI, 5, S. 427) gezeigt worden ist, und sich über Form und Größe der Nuten, Lage der Drähte entschieden, so kann nunmehr die Vorderansicht des Ankers aufgezeichnet werden.

Weiter ist nun E_a , die Leerlaufspannung des Ankers, (vergl. Kap. 11, 9, S. 147)

$$E_a = 2 f \cdot p \cdot \Phi \cdot m \cdot \frac{u}{60} \cdot 10^{-8} \text{ Volt} \dots 32)$$

wenn man mit f den Formfaktor der Stromkurve und mit Φ die Variation der Kraftlinienzahl pro Spule bezeichnet.

Daraus folgt mit Rücksicht auf Gl. 29):

$$\Phi = \frac{E_a \cdot 10^8}{2 f \cdot m \cdot \sim} \dots 33)$$

Für unipolare Maschinen fällt die 2 im Nenner weg.

Führen wir auf der rechten Seite im Nenner

$$AW_u = \frac{AW_a}{\pi D} = \frac{J \cdot m}{\pi D}$$

ein, so erhalten wir:

$$\Phi \cdot D = \frac{E_a \cdot J \cdot 10^8}{2 \pi \cdot f \cdot \sim \cdot \left(\frac{J m}{\pi D} \right)} = \frac{E_a \cdot J \cdot 10^8}{2 \pi f \cdot \sim \cdot AW_u}$$

oder wenn man J durch

$$J = \frac{A}{E_a \cdot \cos \varphi}$$

ersetzt:

$$\Phi = \frac{10^8}{2 \pi f \cdot \sim \cdot \cos \varphi \cdot D} \cdot \frac{A}{AW_u} \dots 34)$$

Mit Rücksicht auf die unvermeidliche Streuung muß man, um den höchsten zulässigen Spannungsverlust $E_a - E_k$ der Maschine auszugleichen, die Kraftlinienzahl noch in dem Verhältnis $E_a : E_k$ vergrößern, sodaß man erhält:

$$\Phi = \frac{10^8}{2 \pi f \cdot \sim \cdot \cos \varphi \cdot D} \cdot \frac{A}{AW_u} \cdot \frac{E_a}{E_k} \dots 35)$$

Mit Hilfe von Φ kann nun die Ankerlänge l berechnet werden, denn es ist:

$$\Phi = l \cdot b \cdot \mathfrak{B}_g,$$

wenn man mit b die Länge des Polbogens bezeichnet. — Wie wir schon erwähnten, ist etwa:

$b = 0,7$ bis $0,8 \frac{\pi D}{2 p}$ bei multipolaren und $b = 0,45$ bis $0,5 \frac{\pi D}{p}$ bei unipolaren Maschinen, oder allgemein $b = C_1 \cdot \frac{D}{p}$.

Wir erhalten, wenn wir D berechnen:

$$D = \sqrt{\frac{10^8}{2 \pi \cdot f \cdot \infty \cos \varphi} \cdot \frac{A}{AW_u} \cdot \frac{E_a}{E_k} \cdot \frac{p}{1 \cdot \mathfrak{B}_g \cdot C_1} \dots} \quad 36)$$

Die Berechnung der Feldmagnete und der Erregerwicklung unterscheidet sich nicht von der Methode, die für Gleichstrommaschinen bereits gelehrt worden ist (vergl. Gleichstromtechnik, Kap. XXII, 2., S. 437), kann daher hier übergangen werden.

Auch die Verlust- und Erwärmungsverhältnisse sind für Wechselstrom nicht anders als für Gleichstrom.

Bemerkt werden muß jedoch, daß der Hysteresisverlust im Ankereisen für die Induktion zu bestimmen ist, die durch die resultierenden Ampèrewindungen AW_u hervorgerufen wird.

Sehr gute Dienste zu einer vorläufigen Bestimmung der Größe der gesamten Polflächen in *qcm* leistet eine von G. Kapp in seinen Vorträgen an der Technischen Hochschule in Charlottenburg gegebene Formel.

Bezeichnet man diese Polfläche mit Q, die scheinbare Leistung der Maschinen (Spannung \times Stromstärke) mit A', mit v die Umfangsgeschwindigkeit des rotierenden Teiles in Metern pro Sekunde, mit p die Anzahl der Polpaare, so ist:

$$A' = C \cdot Q \cdot v \cdot p \text{ oder } Q = \frac{A'}{C \cdot v \cdot p} \dots \dots \dots 37)$$

Die Konstante C hat für Einphasenmaschinen einen Wert zwischen 0,5 und 0,8. Bei Drehstrommaschinen liegt der Betrag von C zwischen 0,7 und 1.

Zur Bestimmung der Anzahl der Ampèrewindungen, um welche die erregende Kraft der Feldmagnete zu vergrößern ist, um die Ankerrückwirkung auf das Feld auszugleichen, hat Kapp¹⁾ für den Fall, daß die Spulenbreite gleich der Breite der Polflächen und diese gleich dem halben Abstände zweier entgegengesetzter Pole ist, die Formel gegeben: $\lambda = 0,0156 m' J \varphi \dots \dots \dots 38)$ Hierin ist m' die Zahl der wirksamen Drähte einer Ankerspule, J die Stromstärke im Anker und φ der Winkel der scheinbaren Phasenverschiebung in Bogengraden.

16. Die Ankerwicklung.

Um aufeinanderfolgende Spulen des Ankers einer Wechselstrommaschine ohne Überkreuzung der Drähte hintereinander schalten zu können, benutzt man den naheliegenden Kunstgriff, daß man rechts herum und links herum gewickelte Spulen aufeinander folgen läßt.

¹⁾ Kapp, Dynamomaschinen für Gleichstrom und Wechselstrom. S. 282.

Die Figur 106 zeigt ein Stück des Feldmagneten und des Ankers einer alten Wechselstrommaschine von Siemens & Halske unter Weglassung aller verbindenden Teile.

Da Wechselstrommaschinen zumeist, wenn auch nicht ausschließlich, für die Erzeugung von Strömen hoher Spannung hergestellt werden, so ist besonders Wert darauf zu legen, daß nicht Drähte sehr nahe beieinander liegen, in welchen wesentlich verschiedene

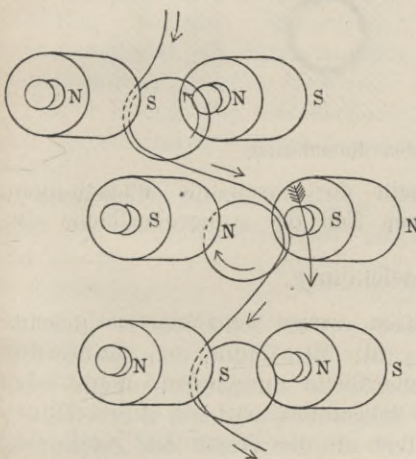


Fig. 106. Schaltung der Ankerspulen bei einer älteren Wechselstrommaschine von Siemens & Halske.

Spannungen herrschen; aus demselben Grunde müssen die Drähte des Ankers voneinander und von den übrigen Metallteilen auf das sorgfältigste isoliert werden. Die Ankerwicklung besteht je nach der Spannung und der Stromstärke, die von der Maschine geliefert werden soll, aus Kupferstäben, Kupferlitze oder Kupferdraht.

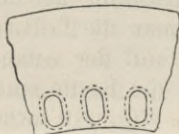


Fig. 107. Lochanker.

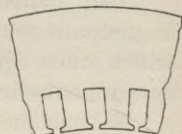


Fig. 108. Nutenanker mit übergreifenden Zähnen.

Diese Leitungsmaterialien werden, soweit dies irgend bei der betreffenden Maschinenart zugänglich ist, in das Innere des Anker Eisens eingebettet, weil durch das benachbarte Eisen die Entstehung von Wirbelströmen im Inneren stärkerer Kupferleitungen sehr gedämpft wird. Man benutzt daher entweder Lochanker, d. h. man legt die gesamte Ankerwicklung in Öffnungen ein, die möglichst nahe der Ankeroberfläche durch das Ankereisen geführt sind (vgl. Fig. 107), oder man benutzt Nutenanker mit übergreifenden Zähnen (vergl. Fig. 108). Der letzten Anordnung hat man neuerdings zumeist den Vorzug gegeben, weil dann die Wicklung sich leichter herstellen läßt, und der Verlust an Kraftlinien, die, ohne von der Wicklung geschnitten zu werden, durch den engen Steg sich schließen, in Wegfall kommt. Neuerdings werden vielfach Stäbe zur Herstellung der Wicklung verwendet, die mit Isolationsmasse umpreßt sind.

In Fig. 109 sind verschiedene Formen der Nuten abgebildet, wie solche bei neueren Wechselstrommaschinen zur Anwendung kommen.

Selbstverständlich muß das zur Wicklung verwendete Kupfer dann zunächst mit besonders gutem, womöglich nahtlosem Isolier-

material umgeben und die isolierten Leiter müssen wieder durch Umwicklung mit Glimmer noch weiter geschützt werden. Bei Hochspannungsmaschinen (über 500 Volt) werden außerdem auch die Innenwände mit Isoliermaterial ausgekleidet.

Was nun die Arten der Ankerwicklung anbetrifft, so unterscheidet man einerseits Spulenwickelungen mit fest abgegrenzten

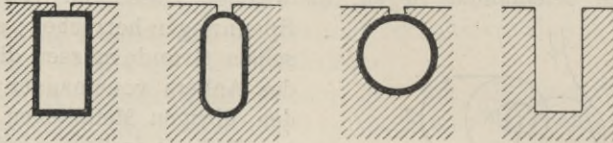


Fig. 109. Verschiedene Nutenformen.

Wickelungselementen und andererseits fortschreitende Wickelungen, deren Elemente auf einen größeren Teil der Ankeroberfläche verteilt sind.

17. Spulenwicklung.

Den halben Abstand der Mitten zweier benachbarter gleicher Magnetpole nennt man die Teilung (d). Den Raum, den die beiden Seiten einer Spule auf der Ankeroberfläche einnehmen, nennt man die Spulenbreite s , die Breite eines Polschuhes wird mit \mathfrak{P} bezeichnet.

Nebenstehende Fig. 110 erläutert an der Hand der Zeichnung diese Begriffe bei einem glatten Anker. Die Weite der Spulen ist hier gleich der Teilung. Spulen, deren Weite genau oder nahezu gleich der Teilung ist, heißen lange Spulen.

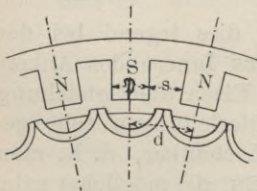


Fig. 110. Erläuterung der Begriffe Teilung d , Polbreite P , Spulenbreite s .

Ist die doppelte Polzahl $2p$ und besteht jede Spule aus n Windungen, so ist die Zahl z der wirksamen Drähte auf der Ankeroberfläche:

$$z = 2pn.$$

Wir wollen übrigens nicht unerwähnt lassen, daß die Zahl z der wirksamen Drähte dieselbe bleibt, wenn man jede zweite Spule ausläßt und dafür jede übrigbleibende Spule mit doppelter Windungszahl herstellt. Alsdann kommt in jedes Loch oder Nute nur eine Spule, während im vorhergehenden Falle zwei Spulen in einem Loche nebeneinander liegen; an die Isolation müssen dann jedoch höhere Ansprüche gestellt werden.

Da die meisten neueren Maschinen für einphasigen oder mehrphasigen Wechselstrom als Innenpolmaschinen gebaut sind, wollen wir für diese Anordnung die Art der Ankerwicklung darlegen. Wir wählen als Beispiel die Konstruktion, wie sie von Siemens & Halske

bei den Wechsel- und Drehstrommaschinen angewendet wird, die mit der Modellbezeichnung R versehen sind (vergl. Fig. 111).

Diese Maschinen haben einen feststehenden Anker R, der aus voneinander durch Papier isolierten Eisenblechringen besteht. In diesem Hohlzylinder rotieren die Feldmagneten M. Um Verluste durch Hysteresis und Wirbelströme möglichst auszuschließen, sind sowohl die Eisenkörper des Ankers als auch die Kerne der Feldmagneten aus voneinander isolierten Eisenblechen zusammengesetzt, die durch isolierte Bolzen zusammengehalten werden.

Der Stern von Feldmagneten ist auf der rotierenden Maschinenwelle befestigt.

Die Kerne der Feldmagneten M sind von den Erregerwindungen umgeben (in der Fig. 111 nicht gezeichnet); der Erregerwicklung wird Gleichstrom durch zwei auf der Welle befestigte Schleifringe zugeführt. Bürsten, die auf diesen Schleifringen aufliegen, stehen mit der Quelle des Erregerstromes, einer kleinen Gleichstrommaschine oder einer Akkumulatorenbatterie in Verbindung.

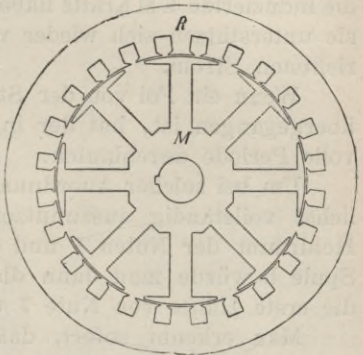


Fig. 111. Gestalt der Eisenteile einer Wechselstrommaschine von Siemens & Halske (Modell R.)

Um die gestanzten Bleche, aus welchen der Anker besteht, für verschiedene Maschinengattungen, einfache Wechselstrommaschinen und Mehrphasenmaschinen, verwenden zu können, werden dieselben mit so vielen Nuten versehen, als überhaupt unter Umständen erforderlich sein können.

Bei Maschinen für einphasigen Wechselstrom werden nicht alle Nuten mit Wicklungen versehen.

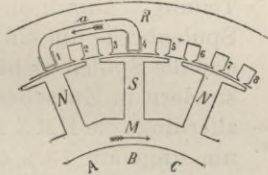


Fig. 112 a.

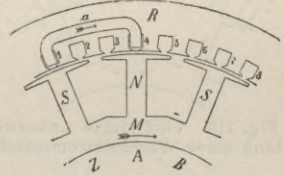


Fig. 112 b.

Induktion im Anker einer Wechselstrommaschine.

Wir erkennen aus Fig. 111 und ebenso aus Fig. 112 a und b, daß ein Polschuh gerade drei Nuten überdeckt, und daß der Abstand der zugewendeten Seiten zweier benachbarter Nuten gleich dem Zwischenraume zwischen zwei aufeinanderfolgenden Magnetpolen von entgegengesetztem Vorzeichen ist.

Um eine günstige Ausnutzung der Drahtlänge einer Spule zu erhalten, denken wir uns zunächst in die Nuten 1 und 4 (Fig. 112 a u. b) eine Spule gewickelt. Lassen wir nun den Stern der Feld-

magneten in der Richtung des Uhrzeigers rotieren, so werden durch die Einwirkung des vor der Nute 1 stehenden Nordpols und des vor der Nute 4 stehenden Südpoles EMKräfte induziert, die sich unterstützen und einen in der Richtung des Pfeiles verlaufenden Strom hervorrufen (Fig. 112a). In der nächsten Stellung (Fig. 112b) steht vor der Nute 1 ein Südpol und vor der Nute 4 ein Nordpol; die induzierten EMKräfte haben nunmehr entgegengesetzte Vorzeichen, sie unterstützen sich wieder und erzeugen einen entgegengesetzt gerichteten Strom.

Wenn ein Pol von der Stellung A in die Stellung C (Fig. 112a) übergegangen ist, hat der in der Spule erzeugte Wechselstrom eine volle Periode durchlaufen.

Um bei solcher Anordnung der Spulen die Ankeroberfläche möglichst vollständig auszunutzen, könnte man mit der Spule a den Hohlraum der Nuten 1 und 4 halb voll wickeln. Mit der zweiten Spule b würde man dann die zweite Hälfte von Nute 4 füllen und die erste Hälfte von Nute 7 u. s. f.

Man erkennt sofort, daß man bei derartiger Anordnung der Ankerwicklung hinsichtlich des Wickelraumes sehr beschränkt ist.

Bei den meisten neueren Maschinen für einphasigen Wechselstrom, den Wechselstrommaschinen im engeren Sinne, verfährt man daher so, daß man die erste Spule a in die Nuten 1 und 3, die zweite benachbarte Spule b in die Nuten 4 und 6, die dritte Spule c in 7 und 9 u. s. f. wickelt (vergl. Fig. 113).

Die Weite einer Spule ist gleich $\frac{2}{3}$ der Teilung. Durch diese Verminderung der Spulenbreite um ein Drittel und dadurch, daß die Spulen nicht dicht nebeneinander, sondern in Zwischenräumen liegen, wird

allerdings die EMK für jede einzelne Spule um ungefähr 13% erniedrigt, dafür aber

kann man in den Hohlraum jeder Nute nunmehr doppelt so viele Windungen einlegen und im Verhältnis von 3:4 mehr Spulen auf der Ankeroberfläche unterbringen als vorher. Man erzielt also noch immer einen namhaften Gewinn entweder, wenn man jede Spule aus doppelt so vielen Windungen herstellt, in der gesamten EMK des Ankers, oder in der Stromstärke, wenn man zur Wickelung Leitungsmaterialien von doppeltem Querschnitte verwendet.

Die Spulen a und c befinden sich zu gleichsinnigen Polen in genau übereinstimmender Lage, in ihnen wird somit EMK von genau gleicher Phase erzeugt. Die in der Spule b erzeugte EMK ist der in a und c induzierten zwar gleich, aber entgegengesetzt gerichtet. Man hat daher das Ende von a mit dem Ende von b und den Anfang

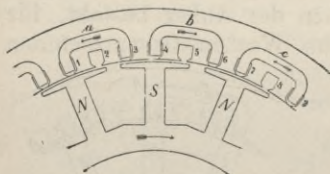


Fig. 113. Veränderte Ankerwicklung einer Wechselstrommaschine.

von b mit dem Anfange von c durch sogenannte Schaltdrähte zu verbinden u. s. f.

Die Nuten 2, 5, 8 bleiben bei der Wickelung von Ankern einfacher Wechselstrommaschinen leer.

Bei der Drehstrommaschine werden alle Nuten für die Wickelung benutzt (Fig. 114). Spule a wird in die Nuten 1 und 4, Spule b in die Nuten 3 und 6, Spule c in die Nuten 5 und 8 gewickelt usw.

Da die Nuten 1, 3 und 5 einerseits und die Nuten 4, 6 und 8 andererseits um je ein Drittel des Winkels voneinander ab- stehen, den die Mittellinie eines Poles, z. B. A, in einer Periode durchläuft, so sind die in den drei Spulen a, b und c erzeugten EMKräfte um je ein Drittel der Periode gegeneinander verschoben. Die dann folgende Spule d hat wieder Strom von genau derselben Phase wie Spule a, ebenso haben die Spulen b und e, endlich c und f Ströme gleicher Phase. Man kann also wieder a, d, . . . , ferner b, e, . . . und c, f. . . hintereinander schalten. Man hat nun drei Stromkreise mit Strömen, die um je ein Drittel der Periode (120°) gegeneinander verschoben sind. Diese drei Zweige werden in der Regel in Sternschaltung miteinander verbunden, d. h. die drei Enden werden miteinander vereinigt (im sogenannten Nullpunkt), und die drei Anfänge werden zu den drei Klemmen geführt, von denen der Strom zum Verbräuche abgenommen wird.

Die Einbettung des Ankercupfers in das Ankereisen, welches zuerst von Wenström und von der Maschinenfabrik »Oerlikon« eingeführt worden ist, wird neuerdings von fast allen Konstrukteuren für Wechselstrommaschinen angewendet.

Es sind auch Dreiphasenwickelungen mit nicht übergreifenden Spulen möglich, indem man die Wickelungen der drei Phasen hintereinander legt. Fig. 115 stellt eine derartige Wickelung dar, die zuerst von Herrn von Dolivo-Dobrowolsky angegeben worden ist.¹⁾ — Besonders eigentümlich ist bei dieser Wickelung, daß die Spulenweite etwas größer als die

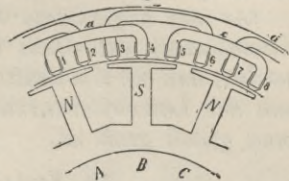


Fig. 114. Ankerwicklung einer Drehstrommaschine.

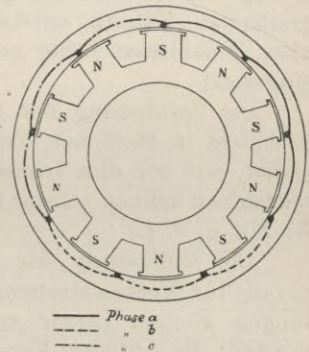


Fig. 115. Drehstrommaschine mit hintereinander geschalteten Phasen.

¹⁾ Die Schaltdrähte, durch die die einzelnen Spulen miteinander passend verbunden werden, sind in der Figur nicht mit gezeichnet. Die Spulen der Feldmagnete sind ebenfalls weggelassen.

Teilung ist. Der Abstand a der Löcher, in welche die Spulen eingebettet werden, ist so gewählt, daß

$$2 p \cdot d = (2 p \pm 1) \cdot a$$

ist, wobei $2 p \pm 1$ ein ganzes Vielfaches der Zahl drei sein muß. Das Ende der Wickelung ist um ein Drittel der Polteilung gegen den Anfang verschoben; Kapp nennt dies eine schleichende Spulenwickelung.

Die hier abgebildete Wickelung, bei der die Spulen jeder Phase hintereinander auf einem Drittel des Ankerumfanges liegen, hat den Nachteil, daß die EM Kräfte in den drei Phasen leicht ungleich werden, wenn der Luftzwischenraum zwischen Anker und Feld nicht überall genau gleich groß ist.

18. Fortschreitende Wickelungen.

Bei Ankern mit aus einzelnen Kupferstäben bestehenden fortschreitenden Wickelungen (Stabwickelung) werden diese Kupferstäbe samt ihrer Isolation meist wirklich in Löcher des geblätternen Anker Eisens eingelegt. Wo es sich um die Einlagerung von eigentlichen Spulen handelt, die aus mehreren Windungen bestehen, wie dies z. B. bei Maschinen für Erzeugung hochgespannten Wechselstromes nötig wird, ist dies nicht wohl angängig. Dann werden diese Löcher nach Vollendung des Aufbaues des Ankereisens aufgefräst, sodaß die in Fig. 108 und 109 dargestellte Form des Nutenankers mit übergreifenden Zähnen entsteht, und in diese Hohlräume werden die über Schablonen fertig gewickelten und sorgfältig isolierten Spulen eingesetzt. —

Die Verbindung der Stäbe zu einer fortschreitenden Wickelung geschieht in ähnlicher Weise durch Gabeln oder Umbiegen der Stabenden, wie wir dies früher schon bei den Ankern der Gleichstrommaschinen kennen gelernt haben (vergl. Gleichstromtechnik, Kap. XIX, S. 278 u. s. f.)

Die Einbettung der Ankerwickelung in das Ankereisen bietet gerade für Wechselstrommaschinen besondere Vorteile dar. Die Wickelungen können besser vor Beschädigung der Isolation geschützt werden; die seitlichen Verschiebungskräfte, die auf stromdurchflossene Drähte von den vorübergehenden Magnetpolen ausgeübt werden, sind ganz gering und werden von den Wänden des Kanals aufgenommen; man kann unbedenklich den Luftraum zwischen Ankereisen und Eisen der Feldmagnete auf ein Minimum verringern. Wegen der Verminderung des magnetischen Widerstandes kann man mit sehr geringem Energieaufwand für die Felderregung auskommen.¹⁾ Diese

¹⁾ Sehr geringe Luftzwischenräume zwischen Ankereisen und Eisen der Feldmagnete sind freilich auch Veranlassung, daß die Ankerrückwirkung sehr merklich wird.

eben erwähnten Vorteile gelten übrigens ebenso für Gleichstrommaschinen wie für Wechselstrommaschinen.

Nur selten werden für Wechselstrommaschinen noch glatte Anker angewendet, weil die Befestigung und gute dauernde Isolation der Drähte Schwierigkeiten macht. Zackenanker geben ungünstige Kurvenformen der EMK und sind daher neuerdings ebenfalls fast völlig außer Gebrauch gekommen.

Vielfach wird der Anker mit einer fortschreitenden geschlossenen Wellen- oder Schleifenwicklung genau wie ein Gleichstromanker hergestellt. Zwei in bezug auf das Feld entgegengesetzt liegende Punkte der Wickelung werden zu zwei Schleifringen geführt und von diesen wird der Wechselstrom abgenommen.

Die nachfolgenden vier Figuren 116, 117, 118, 119 geben Beispiele von Wellen- und Schleifenwickelungen für Maschinen mit Wechselempolen und Maschinen mit Gleichpolen.

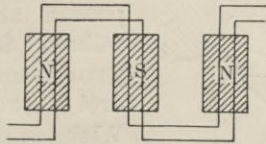


Fig. 116. Wellenwicklung bei Maschinen mit Wechselempolen.

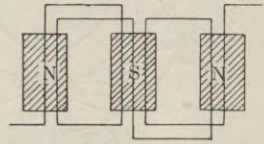


Fig. 117. Schleifenwicklung bei Maschinen mit Wechselempolen.

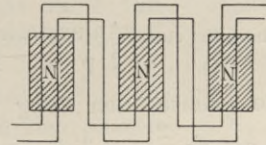


Fig. 118. Wellenwicklung bei Maschinen mit Gleichpolen.

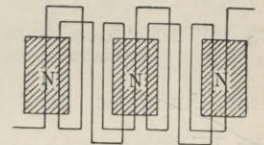


Fig. 119. Schleifenwicklung bei Maschinen mit Gleichpolen.

Die Schleifenwicklung ist für Wechselstrommaschinen, die hohe Spannungen erzeugen sollen, minder beliebt, weil dabei Leiterteile, die große Spannungsunterschiede führen, dicht aneinander vorbeigeführt werden müssen.

Die Hälfte der Drähte, die vor einem Pol stehen, gehört der einen, die andere Hälfte der Nachbarspule an.

Aber auch bei Wellenwickelungen, in welchen die Spannung allmählich von Pol zu Pol wächst, kommen schließlich an den Enden Leiter mit dem gesamten Spannungsunterschiede nebeneinander zu liegen und erfordern besonders gründliche Isolation. Öfter schaltet man deshalb nur die Leiterteile einer Ankerhälfte hintereinander und die beiden Ankerhälfen parallel, dann sind die Stellen, an welchen der größte Spannungsunterschied auftritt, um den vollen Ankerdurchmesser voneinander entfernt.

Bei Maschinen mit Gleichpolen liegen auf dem Raume einer Polteilung doppelt soviel Drähte als bei Maschinen mit Wechselempolen.

Bei den hier abgebildeten Wickelungen behalten die aufeinanderfolgenden Wickelungselemente immer dieselbe relative Lage zu den Polen, sie liegen symmetrisch zu den Polmitten, man nennt sie daher symmetrische Stabwickelungen.

19. Wickelungen für Mehrphasenströme.

Es kommen aber auch schleichende Stabwickelungen, zumal bei Ankern von Drehstrommaschinen vor, bei welchen sich von Pol zu Pol die Lage der Ankerdrähte im Verhältnis zur Polmitte etwas ändert. So zeigt z. B. Fig. 120 die schleichende Stabwicklung einer vierpoligen Drehstrommaschine.

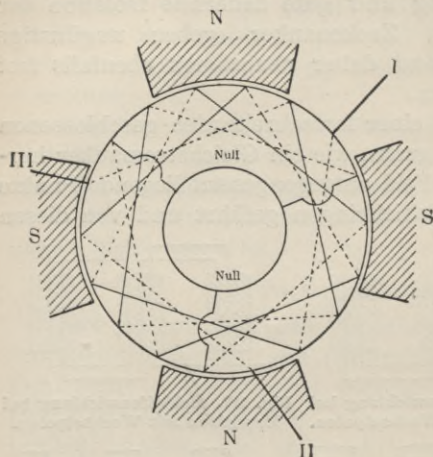


Fig. 120. Schleichende Stabwicklung für eine Drehstrommaschine.

Die Enden I, II, III führen zu den Klemmen, an welchen die drei Stromphasen abgenommen werden, während der mittelste Kreis den gemeinsamen Nullpunkt der drei Wickelungen bildet. Der Wicklungsschritt ist $y = \frac{3z \mp 2}{2p}$, wenn z die Zahl der

Ankerdrähte einer Phase und $2p$ die Polzahl ist. Längs

des Umfanges legt jede Phase den Weg $t z \mp \frac{2}{3} t$ zurück. Die Wicklung schleicht um $\pm \frac{2}{3}$ der Teilung t .

Jeder Gleichstromanker kann, wie bereits erwähnt wurde, dadurch zur Abgabe von Wechselstrom geeignet gemacht werden, daß zwei entsprechende Punkte, bei einem zweipoligen Anker zwei diametral gegenüberliegende Punkte I und II (Fig. 121), mit je einem Schleifringe verbunden werden, von welchen man dann einfachen, d. h. einphasigen Wechselstrom abnimmt. Die maximale EMK entspricht der Induktion in der halben Zahl der Ankerdrähte und die beiden Ankerhälften sind parallel geschaltet. (Vergl. auch Kap. 12, 3., S. 187.)

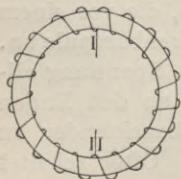
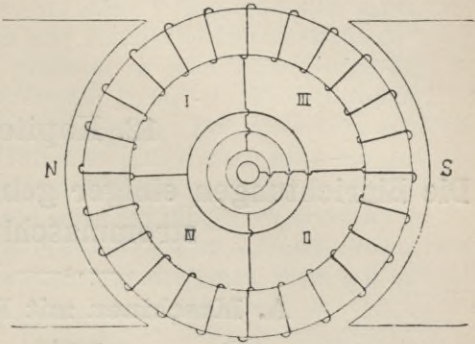


Fig. 121. Gleichstromwicklung für Wechselstrom.

Verbindet man zwei genau in der Mitte dazwischen liegende Punkte III und IV mit zwei weiteren Schleifringen, so kann man auch diesen einen Wechselstrom entnehmen, der in der Phase um 90° gegen den von I, II verschieden ist. Eine solche Anordnung zeigt z. B. Fig. 122.

Bei Maschinen mit p Polpaaren liegen die Ableitungsstellen I I in Graden um $180 : p$ auseinander; der Abstand zweier benachbarter Anschlußpunkte I und II beträgt dann $90 : p$. Verbindet man drei um je 120° (bei Maschinen mit p Polpaaren um $120^\circ : p$) voneinander

abstehende Punkte einer geschlossenen Gleichstromwicklung mit je einem Schleifringe, so können von diesen drei Schleifringen drei um je eine Drittelperiode in Phase voneinander verschiedene Wechselströme (Drehstrom genannt) abgenommen werden. Die Verkettung der Ströme entspricht dem Schema eines Dreieckes, man nennt die so erhaltene Schaltung deshalb Dreiecksschaltung (vergl. Fig. 123).



Die Stromstärke in jedem der Außenleiter ist die vekto- Fig. 122. Gleichstromwicklung für Zweiphasenstrom. rielle Summe (vergl. Kap. 1, 5., S. 8) der Stromstärken in den beiden anschließenden Ankerwickelungen, also $\sqrt{3}$ mal die Stromstärke in den Ankerdrähten. Die verkettete Spannung entspricht der Induktion in $\frac{1}{3}$ der wirksamen Ankerdrähte.

Solche geschlossene Wickelungen für Abgabe von Mehrphasenströmen werden besonders für Gleichstrom—Wechselstrom- und Drehstrom—Gleichstrom-Umformer verwendet.

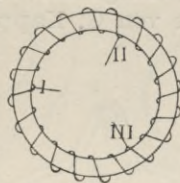


Fig. 123. Gleichstromwicklung für Drehstrom. Dreieckschaltung.

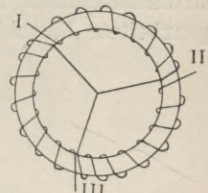


Fig. 124. Gleichstromwicklung für Drehstrom. Sternschaltung.

Schneidet man aber eine geschlossene Gleichstromwicklung an drei um 120° (allgemein $120^\circ : p$) gelegenen Stellen I, II, III auf und verbindet die Enden aller drei Drittel miteinander, so kann man die anderen drei Enden mit drei Schleifringen verbinden und diesen wiederum um 120° in der Phase voneinander verschiedene Wechselströme entnehmen. Die Schaltung (vergl. Fig. 124) ist in diesem Falle eine Sternschaltung. Die Stromstärke in den drei Ableitungen I, II, III ist dann gleich der Stromstärke in den Ankerdrähten; die Spannung ist jedoch die vektorielle Summe, also $\sqrt{3}$ mal so groß als bei der in Fig. 123 dargestellten Anordnung.

Die von uns oben gezeichnete Schaltung, bei der ein zweipoliger Gleichstromanker zwei um 90° in der Phase voneinander verschiedene, voneinander völlig unabhängige Wechselströme liefert, würde für Hin- und Rückleitung zu den Verwendungsstellen vier Leitungen erfordern. Es lassen sich auch hier Verkettungen vornehmen, wodurch eine Leitung gespart werden kann. Wir kommen später bei Besprechung der Zweiphasenmaschinen ausführlicher auf diese Fälle zurück.

12. Kapitel.

Die Einrichtungen einiger gebräuchlicher Wechselstrommaschinen.

A. Maschinen mit Ringanker.

1. Maschinen von G. Kapp.

Als Beispiel des z. Z. bereits etwas veralteten Typus der Wechselstrommaschinen mit Ringanker kann die äußerst sorgsam durchgearbeitete Maschine von G. Kapp dienen.

Zwei parallele, kreisförmige, gußeiserne Jochringe JJ (Fig. 125) tragen zwei sich gegenüberstehende Reihen von Elektromagneten EEE, deren Kerne aus Schmiedeeisen hergestellt sind. Die Kerne enden auf der dem Anker zugewendeten Seite in Polschuhen von fast rechtwinkliger Gestalt und sind auf der anderen Seite durch Schrauben in den

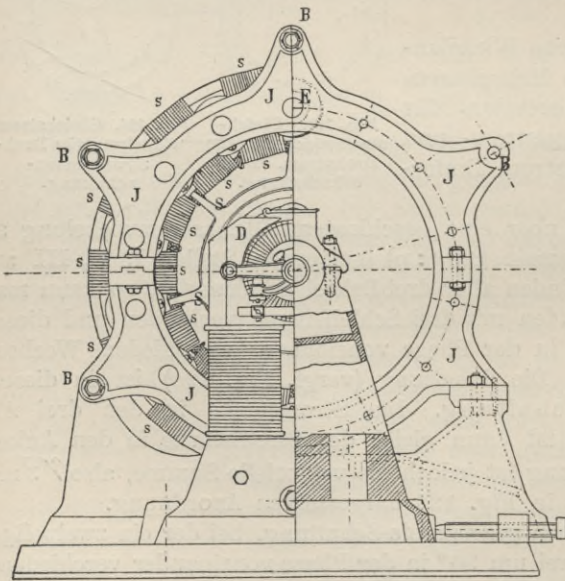


Fig. 125. Wechselstrommaschine mit Ringanker von G. Kapp.

Die Gestalt der Polschuhe und die Verbindung der Spulen läßt die in vergrößertem Maßstabe gezeichnete

Fig. 126 erkennen. Es stehen sich jedesmal zwei Nordpole auf beiden Seiten des Ankers gegenüber, auf diese folgen zwei sich gegenüberstehende Südpole u. s. f. Der aus den Polflächen austretende Kraftlinienstrom teilt sich somit jedesmal in zwei Teile (vergl. Fig. 92, S. 145). Zwischen den Magnetpolen rotiert ein Flachringanker, auf dem die Spulen s, s, s aufgewickelt sind. Der Ankerkern wird dadurch hergestellt, daß man auf einen gußeisernen Ring ein gut ausgeglühtes Eisenband von wenigen Millimetern Dicke zu einem Ringe aufwickelt. Um die einzelnen Lagen des Ringes voneinander zu isolieren und die Entstehung von Foucaultströmen einzuschränken, wird das Eisenband vor dem Aufwickeln auf der einen Seite mit dünnem

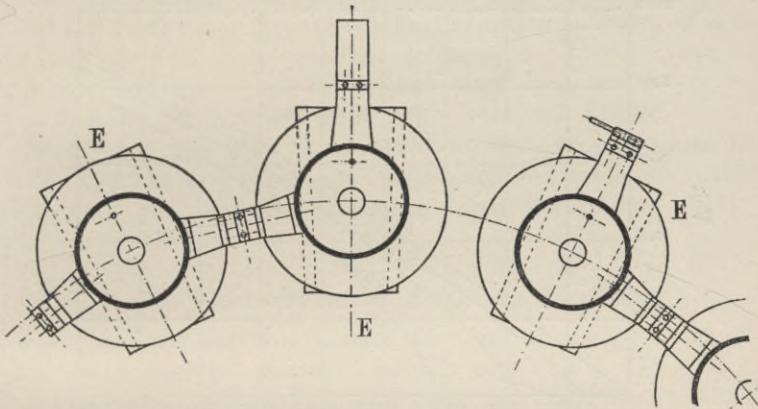


Fig. 126. Anordnung und Verbindung der Elektromagneten einer Kappschén Wechselstrommaschine.

Papier beklebt. Durch Speichen S, S, S wird der gußeiserne Ring mit einer Nabe verbunden, die ihrerseits auf der Ankerwelle aufsitzt und durch Stellringe in der passenden Lage festgeschraubt wird. Um diesen Ring sind ebenso viele Spulen gewickelt, als Pole vorhanden sind. Die Breite jeder Spule ist wenig geringer als der halbe Polabstand. Die Erregung der Wicklung der Feldmagnete geschieht durch eine kleine Gleichstromdynamo D , deren Anker auf der Ankerwelle der Wechselstrommaschine befestigt ist. Auf der linken Seite der maßstäblich gezeichneten Figur ist die Hälfte dieser Erregermaschine samt ihren wesentlichen Bestandteilen angedeutet.

Die Abnahme des Wechselstromes erfolgt durch Schleifringe und Bürsten, die auf beiden Seiten des Ringes angeordnet sind, sodaß eine gleichzeitige Berührung beider Maschinenpole unmöglich ist. Wir geben im nachstehenden nach eigenen Angaben Kapps die Abmessungen für eine derartige Maschine von 60 Kilowatt, die bei 500 Umläufen des Ankers in einer Minute 58 volle Perioden des

Wechselstromes in einer Sekunde gibt und bei 30 Ampère Stromstärke eine Spannung von 2000 Volt liefert.

Der Durchmesser des Kreises, auf dem sich die Mitten der Feldmagnetkerne befinden, beträgt 1000 mm, die Dicke des bewickelten Flachringes 90 mm, der Luftzwischenraum zwischen dem Eisen des Ankers und den zugewendeten Flächen der Polschuhe ist $\delta = 14$ mm.

Das Ankereisen ist mit 14 hintereinander geschalteten Spulen bedeckt, deren jede aus zwei Lagen von je 40 und 39 Windungen aus rundem Kupferdraht von 3 mm Dicke (3,5 mm isoliert) besteht. Es sind somit 1106 Ankerwindungen vorhanden, zu deren Herstellung eine Drahtlänge von ungefähr 800 m erforderlich ist.

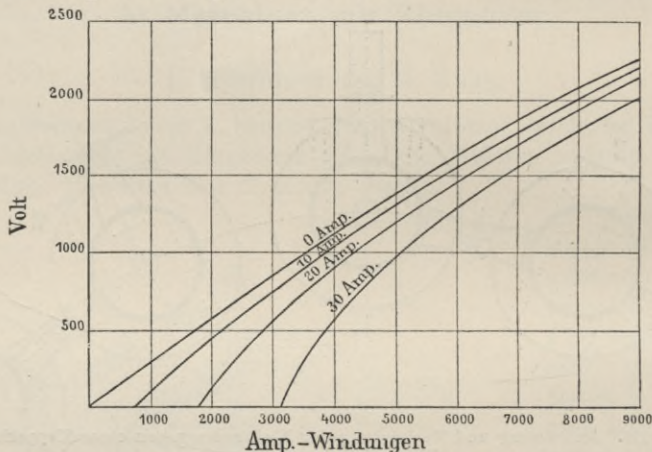


Fig. 127. Verlauf der Klemmenspannung der Kappschen Wechselstrommaschine bei verschiedener Ankerstromstärke und verschiedener Erregung der Feldmagnete.

Die Feldmagneten, deren Eisenkerne eine Dicke von 105 mm und eine freistehende Länge von 19 cm besitzen, sind mit 6 Lagen von je 31 Windungen eines Drahtes von 5 mm Dicke (5,8 mm isoliert) bewickelt. Die Länge des zu einer Spule erforderlichen Drahtes beträgt ungefähr 90 m. Die Polschuhe haben eine Dicke von 22 mm.

Die Klemmenspannung bei verschiedenen Stärken des Erregerstromes und verschiedenen Ankerstromstärken ist aus dem Diagramm Fig. 127 zu ersehen. Derartige Kurven, die man erhält, wenn man die Anzahl der zur Erregung verwendeten Ampèrewindungen als Abszisse, die Klemmenspannungen als die andere Koordinate aufträgt, nennt man die Charakteristik der Maschine. Man kann aus denselben leicht das Verhalten einer Maschine unter verschiedenen Umständen erkennen.

Man sieht z. B., daß bei konstanter und normaler Erregung der Feldmagnete durch etwa 21 Ampère Stromstärke der Spannungs-

abfall vom Leerlauf bis zur Vollbelastung mit 30 Ampère bei Belastung durch induktionsfreie Widerstände ungefähr 280 Volt, d. i. 14 %, beträgt.

Da der Widerstand der 14 Spulen der Feldmagnete ungefähr $1,76 \omega$ (in warmem Zustande) beträgt, so beträgt der Energieaufwand für die Erregung des Magnetfeldes $i^2 \cdot \omega = 21^2 \cdot 1,76 = 780$ Watt, d. i. nur 1,4 % der Leistung der Maschine.

Obleich die Polschuhe abgeschragt sind, um zu plötzliche Änderungen der Feldstärke zu vermeiden, weicht die Kurve, durch welche die EMK als Funktion der Zeit dargestellt wird, nicht unerheblich von der Sinuslinie ab.

Es bedarf kaum der Erwähnung, daß man bei Maschinen dieser Art auch mit nur einem Kranze von Feldmagneten auskommen könnte, wenn man die Feldstärke derselben verdoppelte. Ebenso ist es leicht ersichtlich, daß man auch bei solchen Maschinen den Anker ruhen lassen und die Feldmagnete in Rotation versetzen könnte.

Wenn man den Ring in der Richtung der Achse zu einem Hohlzylinder auszieht und rotierende Feldmagnete als Innenpole ausbildet, kommt man auf eine von Gramme konstruierte ältere Form der Wechselstrommaschine.

2. Die Wechselstrommaschine von Fischinger

kann als Beispiel für eine Konstruktion mit Ringanker und einem Kranz von Außenpolen dienen. Bei der hier in Fig. 128 a, b, c, d, in Vorderansicht, Seitenansicht und Schnitten abgebildeten Maschine für etwa 17 Kilowatt sind 14 Außenpole von abwechselnd entgegengesetztem Vorzeichen vorhanden. Sowohl die rechteckigen Kerne der feststehenden Feldmagnete K als das Eisen des Ankerringes R sind zur Verminderung der Wirbelströme aus dünnen, voneinander isolierten Eisenblechen zusammengebaut.

Der Querschnitt des Ringeisens ist nahezu rechteckig. Die Wickelung des Ankers ist nahe der Außenfläche desselben durch Löcher geführt, während innen die Windungen auf dem Ankereisen aufliegen.

Durch den Rotgußstern SS ist der Ring R mit der rotierenden Ankerwelle AA fest verbunden. Die beiden Enden der Ankerwicklung werden zu zwei mit dem Anker rotierenden Schleifringen s's" geführt. An dem Traversenlager L₁, das in Fig. 128 e noch für sich in vergrößertem Maßstabe abgebildet ist, befinden sich die zum Tragen der Bürstenhalter bestimmten Bolzen B' B", b' b". Auf jedem Schleifringe s' s" schleifen somit, um einen guten Kontakt herzustellen, zwei Bürsten, die untereinander verbunden sind. Die breiten mit

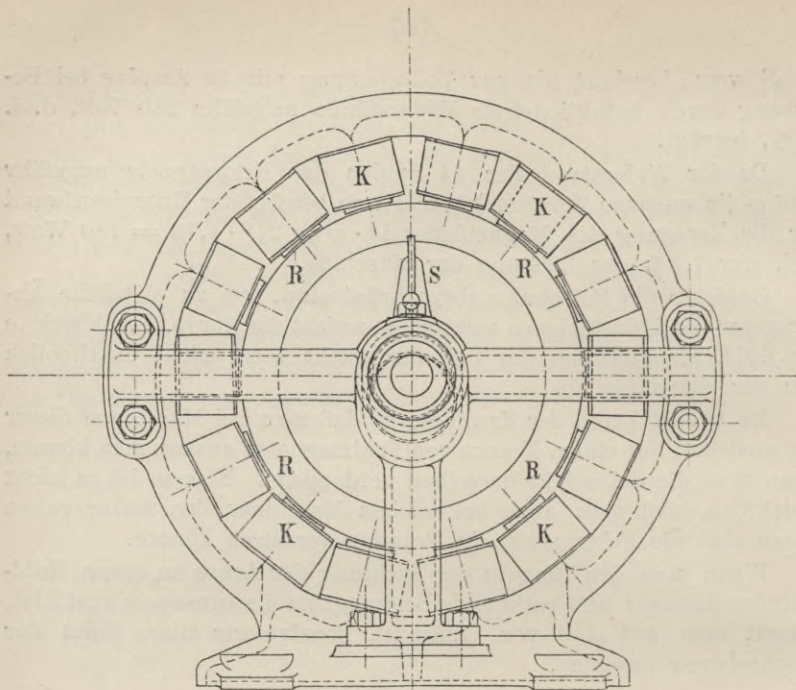


Fig. 128a. Vorderansicht.

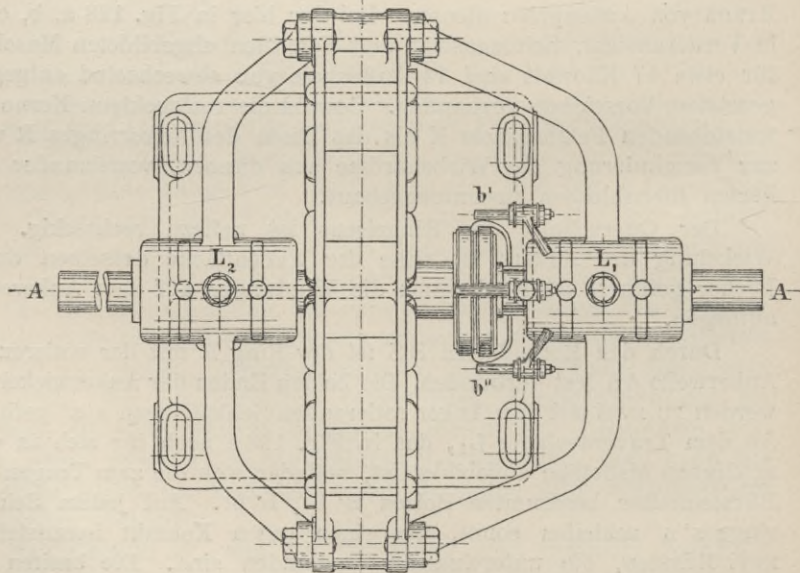


Fig. 128b. Grundriß der Wechselstrommaschine der Aktien-Elektrizitäts-Gesellschaft vorm. Kummer & Co. (konstruiert von Fischinger).

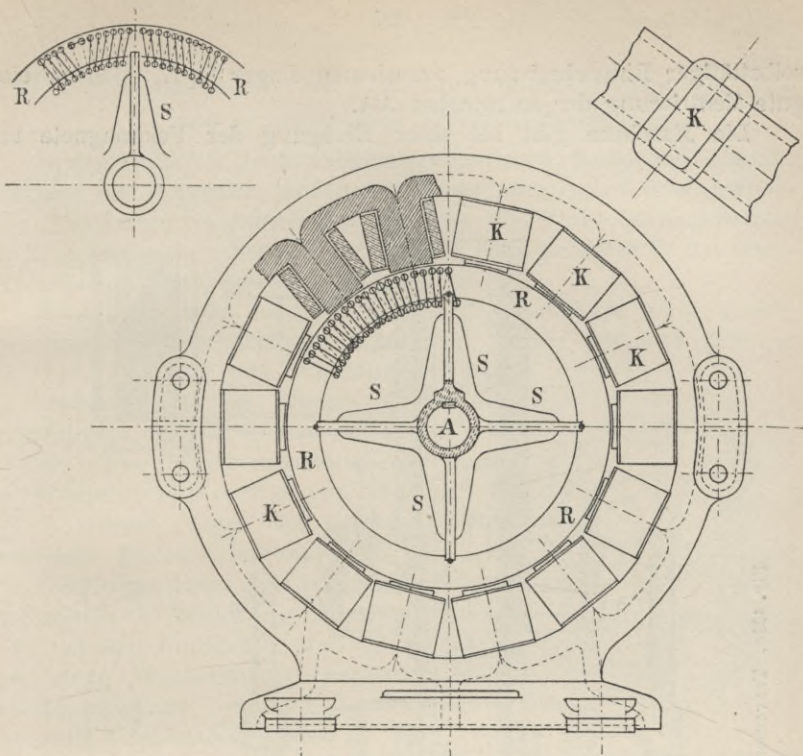


Fig. 128c. Durchschnitt.

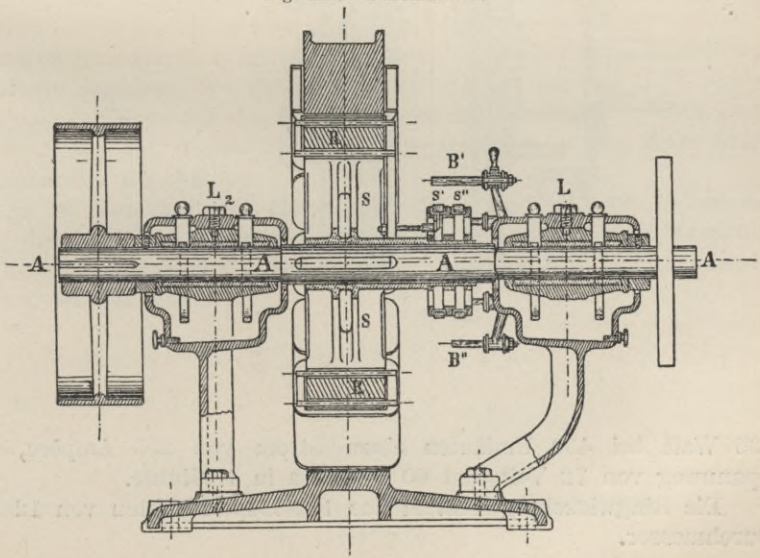


Fig. 128d. Achsenschnitt.

selbsttätiger Ringschmierung versehenen Lager $L_1 L_2$ sichern eine gute Zentrierung der Ankerachse AA.

Die Maschine gibt bei einer Erregung der Feldmagnete mit

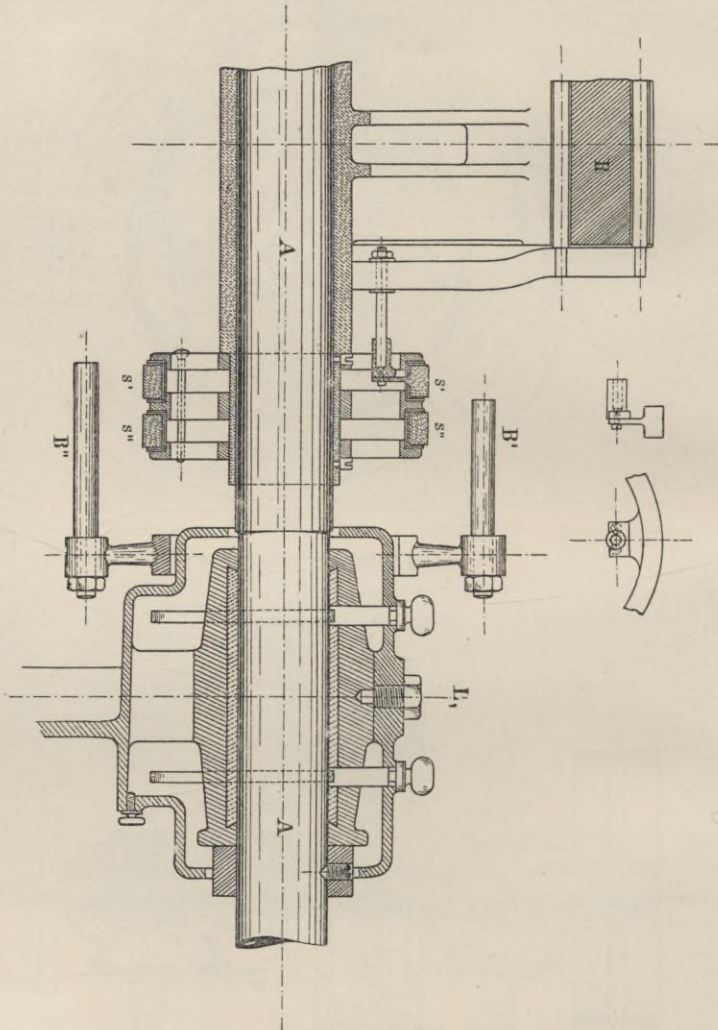


Fig. 128e. Traversenlager.

235 Watt bei 430 Umläufen einen Strom von 235 Ampère, eine Spannung von 72 Volt und 50 Perioden in 1 Minute.

Die Ringwicklung besteht aus 112 Kupferdrähten von 12 mm Durchmesser.

3. Gleichstrommaschinen mit Einrichtungen zur Abgabe von ein- und mehrphasigem Wechselstrome.

An dem einfachen Beispiele einer gewöhnlichen zweipoligen Gramme-Maschine mit Ringanker wollen wir ferner zeigen, daß jede gewöhnliche Gleichstrommaschine ohne weiteres als Wechselstrommaschine zur Erzeugung einfachen Wechselstromes oder mehrerer in der Phase verschobener Wechselströme dienen kann.

Bekanntlich wird in jeder Windung des Ankers einer Gleichstrommaschine Wechselstrom induziert. Gehen wir aus von der Fig. 129. Solange eine Windung sich auf der oberen Hälfte des Ringes durch die Stellungen A, B bis C bewegt, wird EMK in dem einen Sinne induziert, und wenn die Windung sich weiter von C über D und A bewegt, wird ein entgegengesetzter gerichteter Strom induziert.

Wenn man daher stets von zwei bestimmten Punkten der Wicklung Strom entnimmt, z. B. an den Punkten 1 und 3, so erhält man einen Wechselstrom, der eine volle Periode vollendet, während der Ringanker eine volle Umdrehung macht.

Es geschieht dies in einfacher Weise dadurch, daß man z. B. auf den Kollektor der Gleichstrommaschine zwei von den Segmenten isolierte kupferne Schleifringe aufzieht, und den einen Schleifring mit einem Segment, den anderen Schleifring mit dem um 180° gegenüberliegenden Segment des Kollektors leitend verbindet. Durch zwei Bürsten, die auf diesen Schleifringen schleifen, kann man dann Wechselstrom abnehmen.

Es ist ohne weiteres ersichtlich, daß die maximale induzierte EMK dieses Wechselstromes gleich der EMK e_0 ist, die die Maschine als Gleichstrommaschine geben würde. Der zur Zeit t stattfindende Wert e der EMK ist:

$$e = e_0 \cdot \sin 2\pi \frac{t}{T}$$

und der effektive Wert der EMK

$$e_{\text{eff}} = \frac{e_0}{\sqrt{2}} = 0,71 \cdot e_0.$$

Entnimmt man der Maschine die effektive Stromstärke

$$i_{\text{eff}} = \sqrt{2} \cdot i_0,$$

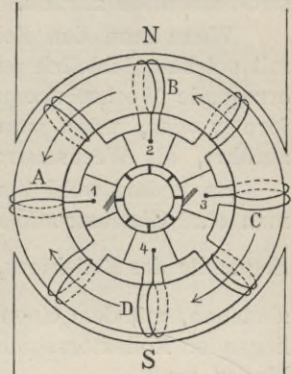


Fig. 129. Gebrauch einer gewöhnlichen Gleichstrommaschine als Wechselstrommaschine.

so ist das Ringeisen und der Kupferdraht der Wickelung genau so beansprucht, als ob man bei Gleichstrom der Maschine die Stromstärke i_0 entnimmt.

Die Leistung der Maschine ist $e_{\text{eff}} \cdot i_{\text{eff}}$, wenn die Belastung nur aus induktionsfreien Widerständen (Glühlampen) besteht, und:

$$J \cdot E = \frac{J \cdot e_0}{\sqrt{2}} \dots \dots \dots 1)$$

d. h. als Wechselstrommaschine verwendet, bleibt die Leistung um 29% d. i. nahezu um ein Drittel hinter ihrer Leistung als Gleichstrommaschine zurück.

Wenn man den Kollektor einer beliebigen Gleichstrommaschine mit solchen Schleifringen versieht, kann dieselbe somit als selbst-erregende Wechselstrommaschine, als Gleichstrom-Wechselstromumformer oder, wenn man ihr Wechselstrom von geeigneter Frequenz zuführt, als Wechselstrom-Gleichstromumformer verwendet werden.

Es bedarf wohl kaum der besonderen Erwähnung, daß, wenn man eine Gleichstrommaschine mit p Polpaaren verwendet, man die Segmente des Kollektors, die um einen Winkel von $\frac{180^\circ}{p}$ voneinander abstehen, mit dem einen Schleifringe und die in der Mitte dazwischen liegenden Kollektorsegmente mit dem zweiten Schleifringe leitend verbinden muß.

Man kann aber auf dem Kollektor einer Gleichstrommaschine auch z. B. 4 Schleifringe aufsetzen, oder in obiger Fig. 129 die Punkte 1 und 3 mit dem einen Paare und 2 und 4 mit dem anderen Paare von Schleifringen verbinden, dann gibt 2 und 4 ebenfalls einen Wechselstrom ab, der aber um 90° in der Phase gegen den von 1 und 3 abgegebenen Wechselstrom verschoben ist. Die Gleichstrommaschine wird dann als Zweiphasenmaschine verwendet.

Ebenso könnte man drei Wechselströme, die in der Phase um 120° gegeneinander verschoben sind, oder sogenannten Drehstrom entnehmen, wenn man 3 Bürsten auf Schleifringen schleifen ließe, die an Kollektorsegmente angeschlossen wären, die um 120° (bei einer zweipoligen Maschine) voneinander abständen. Durch Verbindungen zwischen je zwei der von den drei Schleifringen ausgehenden Leitungen würde ein Wechselstrom fließen, und die drei auf diese Weise möglichen Wechselströme würden Phasenunterschiede von 120° zeigen.

Die effektive EMK, wenn Phasenstrom entnommen wird, ist

$$e_{\text{eff}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot e_0 \cdot \sin \frac{\pi}{f}, \dots \dots \dots 2)$$

sofern sowohl die Felder als die Spannung sinusförmigen Verlauf zeigen.

Hierin bedeutet e_0 die EMK, die von der Maschine unter sonst gleichen Verhältnissen als Gleichstrommaschine gegeben wird, und mit f ist die Zahl der unabhängigen Spulengruppen der Ankerschaltung, beziehentlich die Anzahl der Phasen, bezeichnet.

Die zuletzt betrachteten Fälle entsprechen einer sogenannten geschlossenen Verkettung der Ströme; auch eine offene Verkettung nach dem Prinzip der später zu erwähnenden Stromschaltungen ist möglich,¹⁾ wie wir schon im vorigen Kapitel auf S. 179 gezeigt haben.

B. Wechselstrommaschinen mit Trommelanker.

Es gibt vielverbreitete Wechselstrommaschinen, die Trommelanker besitzen. Ganz besonders eignet sich für Maschinen mit nicht zu hoher Spannung einfache und mehrfache Wellenwicklung, weil bei dieser eine vorteilhafte Ausnutzung der Drahtlänge erreicht werden

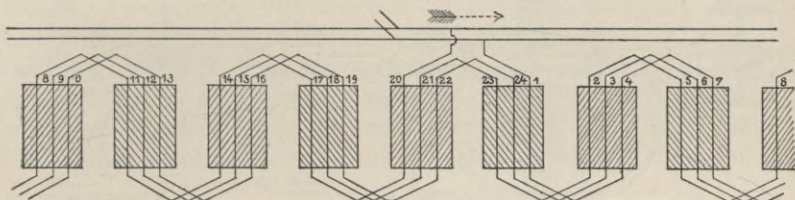


Fig. 130. Doppelte Wellenwicklung des Ankers der Wechselstrommaschine von Blakey-Emmott.

kann. Bei hohen Spannungen bereitet die Isolierung der Ankerdrähte allerdings große Schwierigkeiten. Das vorstehende Wicklungsschema (vergl. Fig. 130) stellt z. B. die Wellenwicklung auf der Oberfläche des Ankers einer vielpoligen

4. Wechselstrommaschine mit Fremderregung von Blakey-Emmott & Co. (Halifax)

dar. Die Wicklung wird aus Bändern hergestellt, die aus mehrfach nebeneinander gelegten, voneinander isolierten Kupferdrähten bestehen. Die in der Fig. 130 als Winkel gezeichneten Verbindungen der wirklichen Ankerdrähte liegen auf der Stirnfläche des Ankers. Bei der in Fig. 131 abgebildeten 10 poligen Maschine der Vorgenannten, die bei 1200 Umläufen 2000 Volt Klemmenspannung bei 7,5 Ampère Stromstärke und eine Frequenz von 50 Perioden in einer Sekunde ergibt, ist der Anker aus sehr dünnen Scheiben von Holzkohleneisen her-

¹⁾ Vergl. Friese, ETZ Bd. XV, 1894, S. 101 u. s. f.

gestellt. Die einzelnen Scheiben sind voneinander durch dünnes Papier und Lack isoliert und auf einen Stern aus Rotguß aufgereiht, der auf der Ankerwelle festgekeilt ist. Um das Auftreten von Wirbelströmen in der Ankerwicklung zu vermindern, ist es zweckmäßig, die Ankerdrähte in das Eisen selbst einzubetten, also entweder Lochanker (vergl. Grundzüge, Kapitel XXI, 2., S. 400) oder Nutenanker mit über die Nut zum Teil übergreifenden Vorsprüngen des Eisens zu verwenden. (Vergl. Fig. 108 und 109.)

Selbst ein sorgsames Unterteilen stärkerer Querschnitte des Ankerdrahtes in mehrere parallele, aber voneinander isolierte Litzen wirkt nicht entfernt so vorteilhaft auf die Beseitigung parasitischer

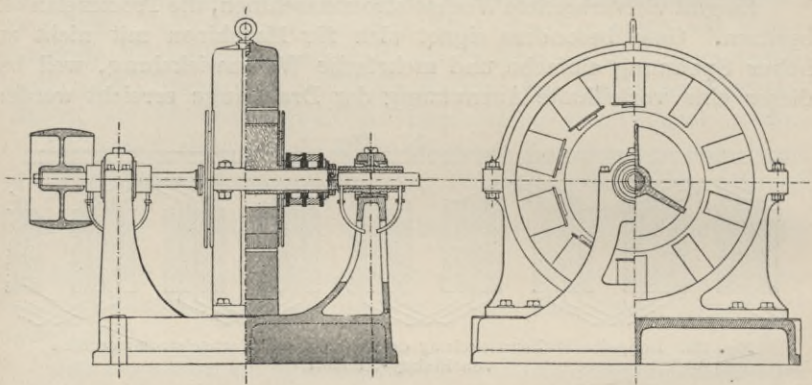


Fig. 131. Wechselstrommaschine mit Trommelanker von Blakey-Emmott.

Wirbelströme in der Ankerwicklung, als die möglichst vollkommene Einbettung derselben in das Ankereisen.

Der Anker der hier abgebildeten Maschine hat 1140 wirksame Drähte und besitzt einen Widerstand von 4,48 Ohm. Der Ankerdurchmesser beträgt 46 cm.

Der zeitliche Verlauf der in den Ankerdrähten induzierten EMK ähnelt sehr einer Sinoide.

Die Maschine gehört, wie man sieht, zu den Außenpolmaschinen. Die obere Hälfte des Kranzes von Feldmagneten kann nach Lösung der Verbindungsschrauben abgehoben und dadurch der Anker zugänglich gemacht werden.

Die Kerne der Feldmagnete wurden früher massiv hergestellt; infolge der in den Enden der Pole induzierten Wirbelströme erwärmten sich dieselben jedoch beträchtlich. Um diesen Übelstand zu beseitigen, zieht man neuerdings vor auch die Feldmagnete aus dünnen, von-

einander isolierten Blättern von weichem Eisen herzustellen. Die Trennungsflächen verlaufen dabei rechtwinklig zu den Ankerdrähten.

In der äußeren Gestalt sind der soeben beschriebenen sehr ähnlich die

5. Wechselstrommaschinen der Westinghouse-Company (Stanley).

Der Eisenkern des Ankers ist ebenfalls aus dünnen, voneinander isolierten Scheiben aus Walzblech hergestellt. In diese Bleche sind außer den Nuten für die Aufnahme der Wickelung noch Löcher gestanzt, die nach Fertigstellung des Ankers der Achse parallel laufende Ventilationskanäle bilden. Zwei durchbrochene Rotgußscheiben bilden die seitlichen Begrenzungen des Ankers. Diese Scheiben haben eine Anzahl Vorsprünge, die zur Befestigung einer gleichen Zahl von Ankerspulen dienen. Die Ankerspulen werden über Formen gewickelt, dann in die Ankernuten eingelegt und die Enden über die erwähnten Vorsprünge herabgebogen. Durch starkes Umwickeln mit isoliertem

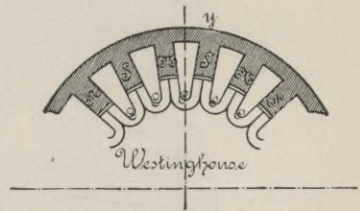


Fig. 132. Anker mit darüber stehenden Feldmagneten der Wechselstrommaschine der Westinghouse-Company.

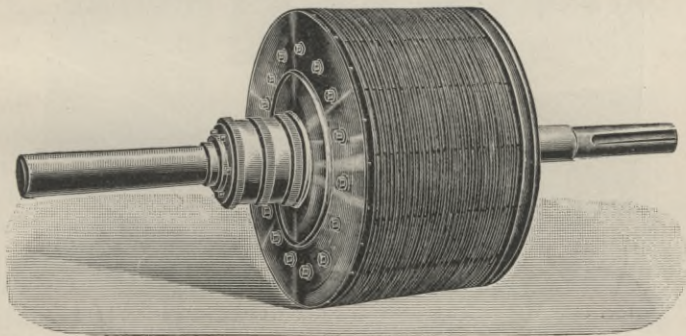


Fig. 133. Äußere Ansicht des fertigen Ankers einer Wechselstrommaschine der Westinghouse-Company.

Bindendraht werden die Spulen dann in ihren Lagen gehalten. Die Fig. 132 zeigt eine Seitenansicht des Ankers und der darüberstehenden Feldmagnete und läßt erkennen, wie die Befestigung der Spulen auf den Endplatten durchgeführt worden ist. Damit nicht Drähte mit sehr verschiedenen Spannungen in unmittelbare Berührung kommen, sind sowohl die geradzahigen als die ungeradzahigen Spulen hintereinander und diese beiden Gruppen parallel geschaltet.

Während die vorhergehende Abbildung nur eine schematische Darstellung ist, zeigt Fig. 133 den fertigen Anker einer solchen Maschine.

Besonders bemerkenswert ist die hohe Frequenz dieser Art von Maschinen, 144 volle Perioden in der Sekunde.

Die Einrichtung der Feldmagnete bietet nichts Abweichendes dar. Fig. 134 zeigt die äußere Einrichtung einer solchen Maschine,

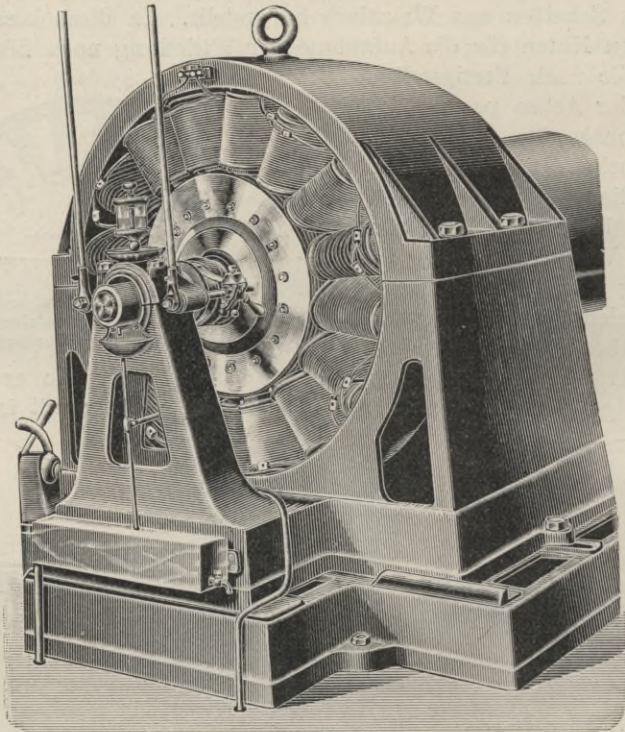


Fig. 134. Wechselstrommaschine der Westinghouse-Company.

die bei 1080 Umläufen 145 Ampère bei 1100 Volt liefert, wenn die Feldmagnete durch einen Strom von 27 Ampère und 100 Volt erregt werden.

Zu den Übergangsformen gehört

6. die neue Wechselstrommaschine von Siemens & Halske, Mod. R.

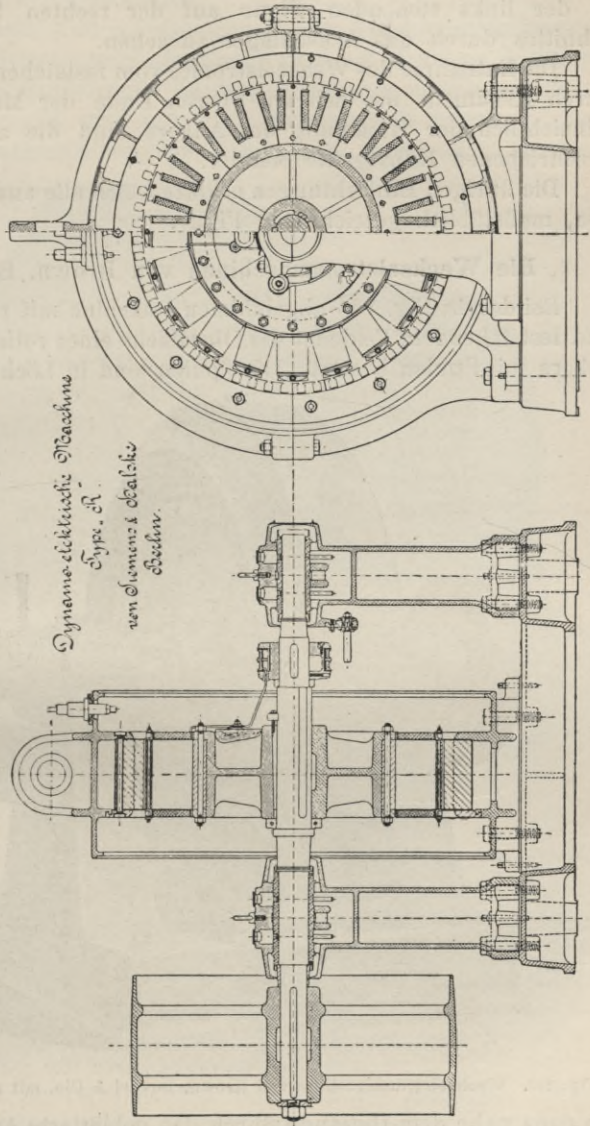
Diese Maschinen können als Maschinen mit Trommelanker mit Wicklung auf der Innenseite der Trommel angesehen werden. Den feststehenden Anker und die rotierenden Feldmagnete zeigt Fig. 135.

Bei der einen Hälfte der rechtsstehenden Figur sind die Elektromagnete im Durchschnitt gezeichnet, um die Gestalt des Kernes und die über die Spulen übergreifenden Polschuhe deutlich sichtbar zu machen.

Die Feldmagnete haben Kerne von länglich rechteckigem Querschnitt, die aus voneinander isolierten weichen Eisenblechen hergestellt sind. Diese Kerne sind auf dem äußeren Umfange eines gußeisernen Schwungrades befestigt. Die Spulen der Feldmagnete sind ebenfalls sorgfältig auf dem Umfange des Schwungrades befestigt.

Der Anker besteht aus zwei feststehenden gußeisernen Ringen, in deren Hohlräumen durch isolierte Bolzen die voneinander isolierten eisernen Blätter befestigt sind, aus denen das

Ankereisen zusammengesetzt ist. Die Ankerspulen sind in Nuten eingewickelt, wie wir das früher in Kapitel 11, Abschnitt 16, S. 171,



näher beschrieben haben. Der Erregerstrom wird durch zwei Schleifringe aufgenommen, die mit Anfang und Ende der Wicklung der Feldmagnete in leitender Verbindung stehen. Diese Schleifringe sind in der links stehenden Figur auf der rechten Seite des Durchschnittees durch das Achsenlager zu sehen.

Die Entnahme des Wechselstromes vom feststehenden Anker erfolgt durch Klemmen, die sich am oberen Ende der Maschine befinden. Hinsichtlich der Wicklung des Ankers sind die auf S. 174 näher beschriebenen Kunstgriffe benutzt.

Die übrigen Einrichtungen erklären sich alle aus der nebenstehenden, maßstäblich gezeichneten Figur.

7. Die Wechselstrommaschinen von Brown, Boveri & Cie.

Bei der in Fig. 136 abgebildeten Maschine mit rotierendem Anker und feststehendem Felde ist die Oberfläche eines rotierenden Trommelankers mit Spulen besetzt. Die Spulen sind in Löcher untergebracht,

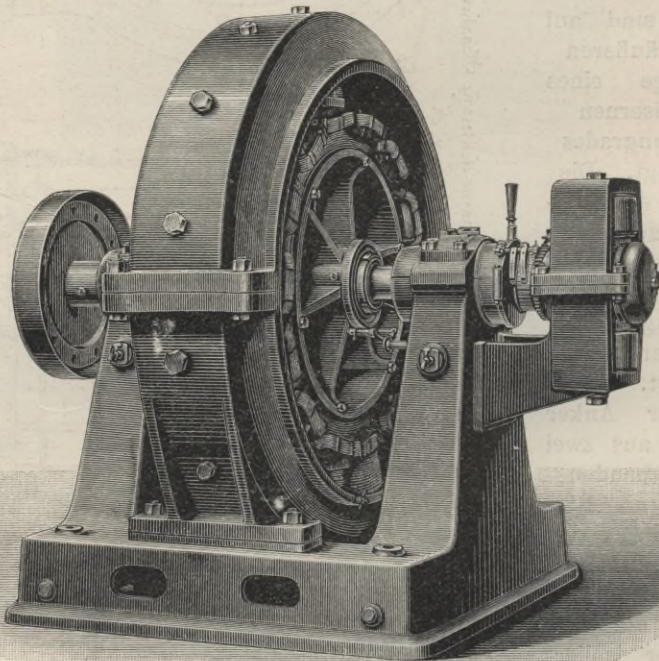


Fig. 136. Wechselstrommaschine von Brown, Boveri & Cie. mit rotierendem Anker.

die ganz nahe dem Umfange durch das geblätterte Ankereisen geführt sind. Durch nahtlose Röhren eines um die Windungen gelegten Isolationsmaterials sind die Spulen gegen Berührungen mit dem

Eisenkörper vollständig geschützt. Der in den Spulen erzeugte Wechselstrom wird durch Schleifringe, die sich auf der Welle befinden, und feststehende Bürsten abgenommen.

Die Feldmagnete sind an das gußeiserne Maschinengehäuse angeschraubt; die Befestigungsschrauben sind am äußeren Umfange dieses zweiteiligen Gußkörpers in der Abbildung zu sehen. Jeder Kern des Feldmagnetes wird mit einer Erregerspule versehen. Den Strom für die magnetisierenden Windungen liefert eine Erreger-

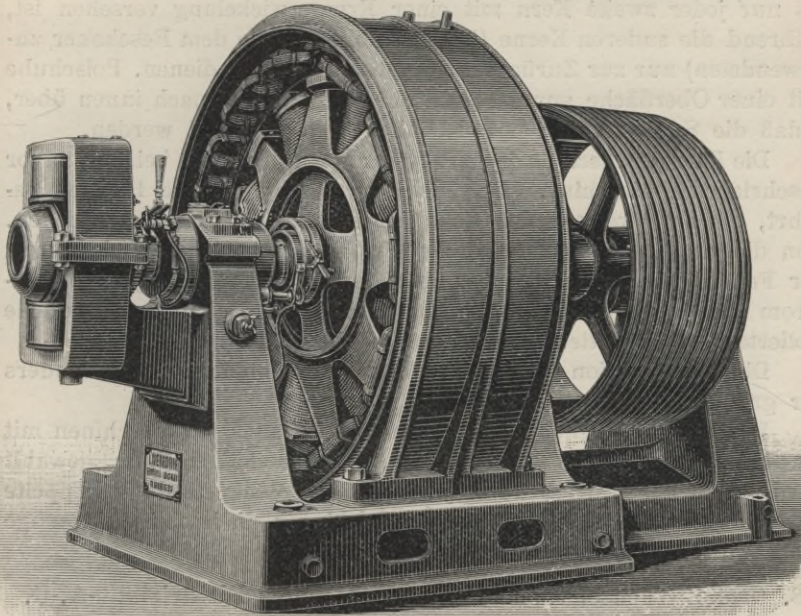


Fig. 137. Wechselstrommaschine von Brown, Boveri & Cie. mit rotierendem Elektromagneten.

maschine, die unmittelbar an das Gestell der Wechselstrommaschine angebaut ist. Der Anker dieser Gleichstrommaschine (rechts in der Fig. 136) ist fliegend auf die verlängerte Welle aufgesetzt; der Kollektor befindet sich auf der dem Lager zugewendeten Seite. Das Feld der Erregermaschine ist vierpolig, aber nur die zwei sich gegenüberstehenden Pole sind mit Magnetspulen versehen.

Das Gehäuse der Wechselstrommaschine ist zweiteilig. Wenn man die obere Hälfte abhebt, ist der Anker leicht zugänglich.¹⁾

¹⁾ Die Leistung dieser Maschine beträgt 120 Pferdestärken und zwar 2200 Volt bei 37 Ampère. Die Umlaufzahl ist 560. Der Anker hat 770 Drähte von 4 mm

Die oben genannte Firma baut aber auch Wechselstrommaschinen mit feststehendem, hohlzylindrischem Trommelanker und umlaufenden Feldmagneten. Eine derartige Maschine für Seilantrieb ist in Fig. 137 dargestellt. Auch bei dieser Anordnung sind die Ankerspulen in Löcher eingebettet, die sich ganz dicht unter der inneren Oberfläche des aus geblättertem Eisen hergestellten, ruhenden Ankerkörpers befinden.

Die Feldmagnete zeigen insofern besondere Eigentümlichkeiten, als nur jeder zweite Kern mit einer Erregerwicklung versehen ist, während die anderen Kerne (in der Abbildung die dem Beschauer zugewendeten) nur zur Zurückführung der Kraftlinien dienen. Polschuhe mit einer Oberfläche aus geblättertem Eisen greifen nach innen über, sodaß die Spulen von den Polschuhen völlig bedeckt werden.

Die Erregermaschine ist ganz so angeordnet, wie bei der zuvor beschriebenen Maschine. Der Gleichstrom wird zu zwei Bürsten geführt, die auf zwei auf der Welle befestigten Schleifringen aufliegen. Von diesen Schleifringen wird der Strom dann in die Wicklungen der Feldmagnete geleitet. Der im ruhenden Anker erzeugte Wechselstrom wird durch zwei an der oberen Seite des Gehäuses befindliche isolierte Röhren mittels Kabel nach außen geleitet.¹⁾

Die Konstruktion mit rotierenden Feldmagneten wird besonders für größere Maschinen bevorzugt.

Besonders geeignet ist diese Anordnung auch für Maschinen mit vertikaler Lage der Hauptwelle, die in vielen Fällen dann gewählt wird, wenn der Antrieb durch eine mit der Welle direkt gekuppelte Turbine erfolgen soll. Es werden weiterhin auch einige derartige Maschinen beschrieben und abgebildet.

8. Große Wechselstrommaschine von Helios Elektrizitäts-A.-G. in Köln.

Während früher die Elektrizitäts-A.-G. Helios in Köln und die ihr verwandte Firma Ganz & Co. in Budapest für ihre großen Maschinen auch im Anker zackenartige Vorsprünge anbrachten, also eine Art von ruhendem Polanker verwendeten, sind neuerdings auch diese Firmen zu der jetzt allgemein üblichen Ankerkonstruktion übergegangen.

Die in Fig. 138, 139, 140, 141²⁾ abgebildete Maschine ist hervor-

Dicke, der Eisenquerschnitt des Ankers beträgt 200 *qcm*. Die Feldmagnete tragen Spulen von 400 Windungen eines Drahtes von 4 *mm* Dicke. Widerstand der Magnetwicklung = 5,5 ω .

¹⁾ Die Wickelungsverhältnisse einer gleichgroßen Drehstrommaschine werden in Kapitel 13 mitgeteilt.

²⁾ Die Abbildungen Fig. 138 bis 141 sind der Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure, Bd. XLV (1901) mit gütiger Genehmigung des Autors und der Redaktion entnommen.

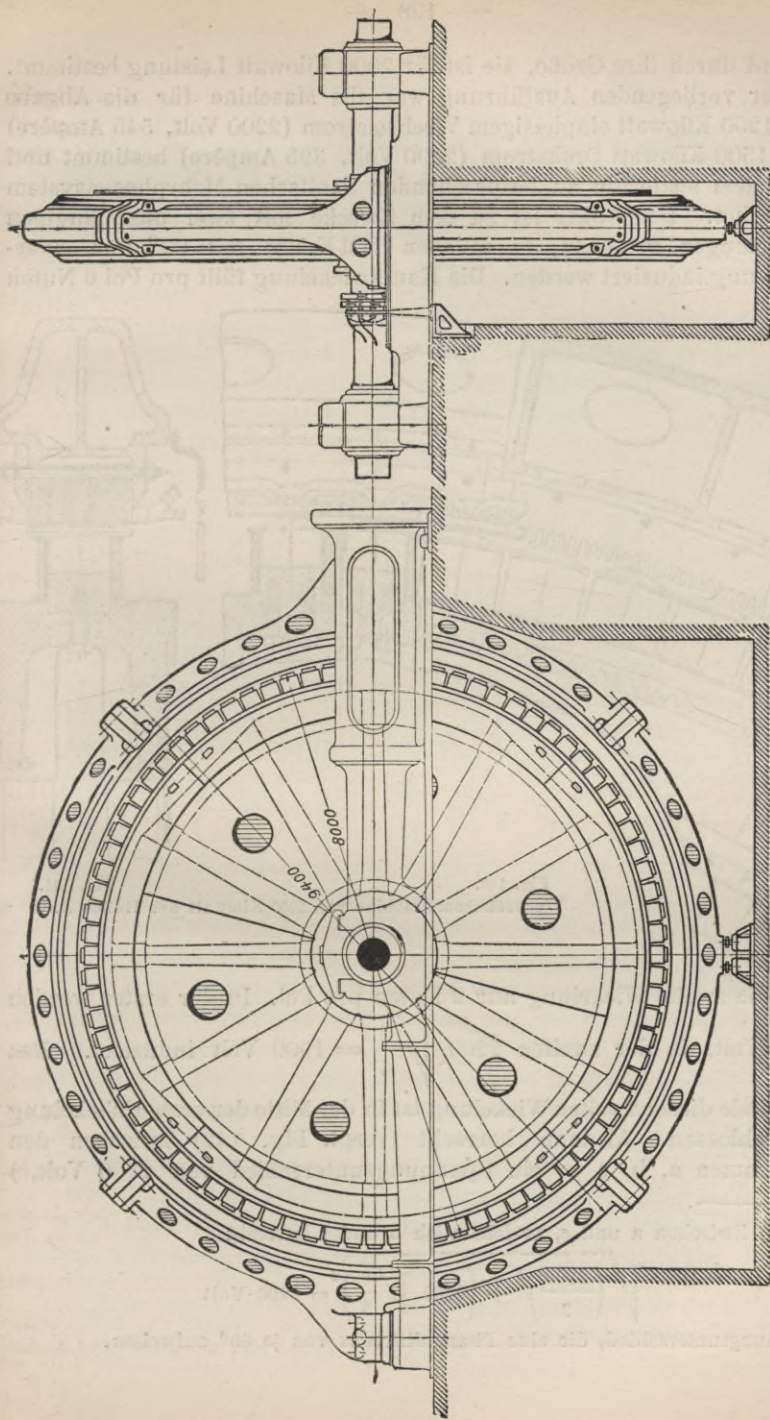


Fig. 139.

Fig. 138.

2000 Kilowatt-Wechselstrommaschine der Firma Helios A.-G.

ragend durch ihre Größe, sie ist für 2000 Kilowatt Leistung bestimmt. In der vorliegenden Ausführung war die Maschine für die Abgabe von 1200 Kilowatt einphasigem Wechselstrom (2200 Volt, 545 Ampère) und 1500 Kilowatt Drehstrom (2200 Volt, 395 Ampère) bestimmt und nach dem späterhin zu besprechenden Scottschen Mehrphasensystem geschaltet. Der Anker ist zu dem Zwecke mit zwei unabhängigen Wicklungen versehen, in welchen EMKräfte mit 90° Phasenverschiebung induziert werden. Die Hauptwicklung füllt pro Pol 6 Nuten

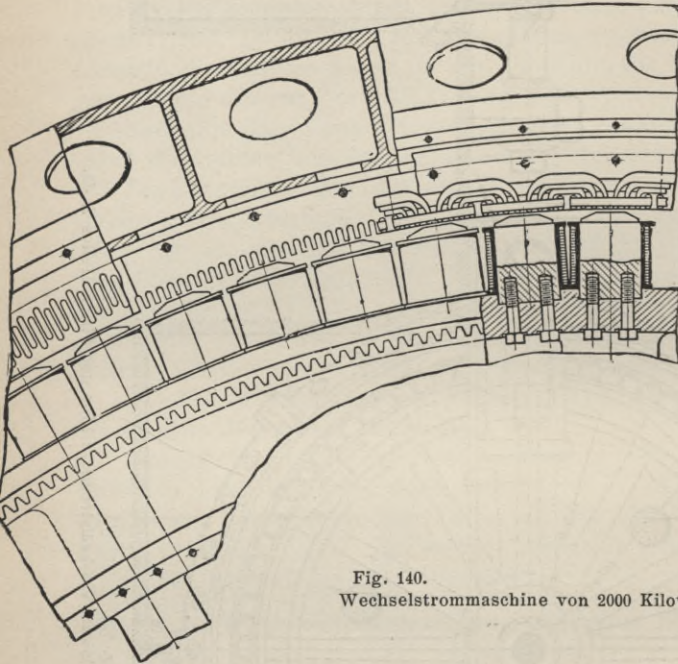


Fig. 140.
Wechselstrommaschine von 2000 Kilowatt der Helios A.-G.

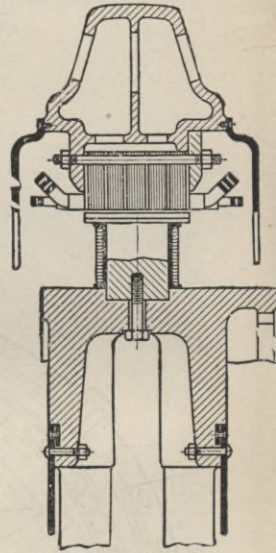


Fig. 141.

aus, die zweite Wicklung nur 2 Nuten pro Pol. In der ersten werden 2200 Volt, in der zweiten $2200 \sqrt{\frac{3}{4}} = 1900$ Volt induziert. Das eine Ende dieser zweiten Wicklung ist in der Mitte der ersten Wicklung angeschlossen. Alsdann herrscht (vergl. Fig. 142) zwischen den 3 Klemmen a, b, c je ein Spannungsunterschied von 2200 Volt,¹⁾

¹⁾ Zwischen a und c, beziehentlich b und c herrscht

$$\sqrt{\left(\frac{2200}{2}\right)^2 + \left(2200 \sqrt{\frac{3}{4}}\right)^2} = 2200 \text{ Volt}$$

Spannungsunterschied, die eine Phasendifferenz von je 60° aufweisen.

die zusammen Drehstrom liefern. Der ruhende Anker ist vierteilig und besitzt eine Bohrung von 8020 mm , einen äußeren Durchmesser von 9400 mm . Der Luftzwischenraum zwischen Ankereisen und äußerster Fläche der rotierenden Feldmagnete beträgt 10 mm .

Fig. 138 zeigt den allgemeinen Aufbau in Vorderansicht und Fig. 139 einen Schnitt der Maschine, während Fig. 140 und 141 die Einzelheiten der Anordnung des Ankers und der Feldmagnete deutlicher erkennen lassen.

Die Ankeroberfläche besteht aus einzelnen Blechpaketen von 350 mm axialer Breite und 140 mm radialer Höhe, es gibt deren fünf mit vier zwischenliegenden radialen Luftschlitzen. Der mittlere Teil des Blechpaketes ist breiter als die übrigen.

Um die Stoßfuge an den Stellen, an welchen die 4 Gehäuseteile zusammenstoßen, magnetisch zu überbrücken, werden einzelne Blechpaketeile erst eingesetzt, nachdem die vier Teile zusammengefügt worden sind. Auch die Wickelung kann dann erst an diesen Stellen völlig beendet werden.

Die wirksame Drahtzahl beträgt 504 für die Hauptwicklung, 334 für die Nebenwicklung.¹⁾ Die Zahl der Nuten ist 672, jede Nute ist 19 mm breit, 50 mm hoch und 10 mm geschlitzt.

Die Hauptwicklung enthält in jeder Nute 3 parallel geschaltete Kabel von zusammen 220 qmm Querschnitt, die Hilfswickelung 6 Kabel, dreifach parallel von zusammen 118 qmm Querschnitt.

Das Feldmagnetsystem wird von einem gußeisernen Rade mit 12 Doppelarmen getragen und besteht aus 84 Elektromagneten von kreisrundem Querschnitt (210 mm Durchmesser). Die Kerne sind in Einfräsungen des Radkranzes sehr sorgsam eingelassen und werden durch je zwei Schrauben festgehalten. Die Polschuhe mit einem Polbogen von 200 mm sind stark abgeschrägt, um den Stromkurven einen möglichst sinusidalen Verlauf zu geben.

Die Wickelung jedes Poles des Feldmagnetsystemes besteht aus 54 Windungen hochkant gewickelten Kupferbandes (Gewicht der gesamten Erregerwicklung 3500 kg). Der Energieaufwand für die

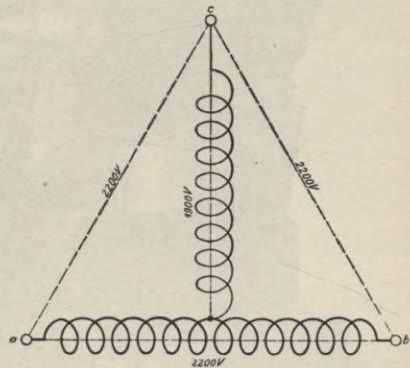


Fig. 142. Schaltungsschema der Heliosmaschine.

¹⁾ Diese beiden Zahlen stehen nicht ganz in dem Verhältnis der EMKräfte, weil der Formfaktor der in der zweiten Wickelung induzierten EMK wesentlich größer ist als in der Hauptwicklung.

Erregung beträgt etwa 24 Kilowatt. Der Magnetisierungsstrom wird von einer selbständigen Gleichstrommaschine geliefert, die besonders angetrieben wird.

C. Wechselstrommaschinen mit Scheibenanker.

Eine der ältesten, verbreitetsten und bewährtesten Einrichtungen dieser Art ist

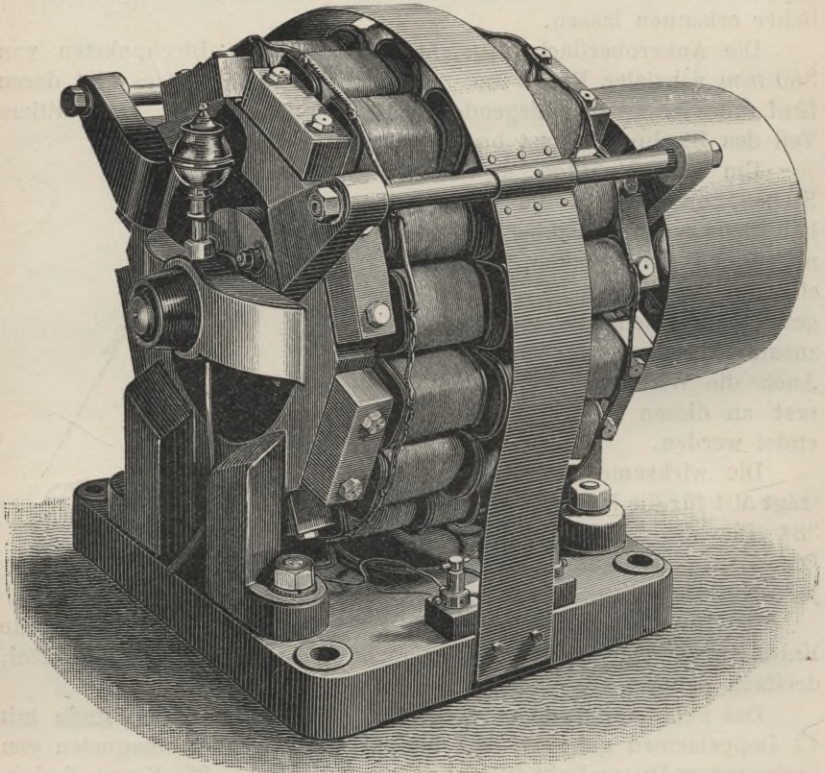


Fig. 143. Wechselstrommaschine mit Scheibenanker von Siemens & Halske.

9. die ältere Wechselstrommaschine von Siemens & Halske.

Zwei Kränze von Elektromagneten sind als Feldmagnete auf zwei feststehenden gußeisernen Ringen angeordnet. Auf den beiden Seiten stehen sich immer entgegengesetzte Pole gegenüber, und ebenso wechseln auf derselben Seite entgegengesetzte Pole miteinander ab (vergl. Fig. 143).

In dem auf diese Weise entstandenen vielpoligen Felde rotiert ein Scheibenanker mit ebenso vielen Spulen, als Magnetfelder vorhanden sind. Die durch Rotation durch die Magnetfelder in den

einzelnen Spulen erzeugten Ströme werden entweder getrennt, oder parallel, oder hintereinander, oder in Gruppen geschaltet an Schleifringe geführt, die mit einer Zwischenlage von Isolationsmaterial auf der Ankerwelle befestigt sind.

Die Abmessungen der Spulen und des Feldes sind so getroffen, daß, wenn die eine Seite einer Spule sich noch in dem einen Magnetfelde befindet, die andere Spulenseite sich bereits im nächsten Magnetfelde bewegt.

Bei den älteren Maschinen dieser Art waren die Kerne der Feldmagnete aus massivem Schmiedeeisen hergestellt, der Hohlraum der Ankerspulen war mit Holz ausgefüllt. Der Anker dieser Wechselstrommaschinen enthielt also kein Eisen; die Querschnitte der Magnetkerne und der Spulen waren kreisförmig. Bei den neueren Maschinen sind sowohl die Kerne der Feldmagnete als auch die Kerne der Ankerspulen aus dünnen Eisenblättern hergestellt, die durch aufgeklebtes Papier und Lack voneinander isoliert sind. Zur Herstellung der Wickelung der Ankerspulen dient Kupferband. Durch zwischengelegte Streifen von Isolationsmasse werden die einzelnen Windungen voneinander isoliert. Der Querschnitt der Kerne und Spulen ist bei den neueren Maschinen nahezu rechteckig geworden.

Zur Erregung der Feldmagnete dient der Strom einer kleinen Gleichstrommaschine.

Die äußere Ansicht einer Siemensschen Maschine mit Eisen im Anker zeigt die Fig. 143. Ein großer Vorteil dieser Konstruktion ist der, daß eine schadhaft gewordene Spule leicht ausgewechselt werden kann.

Bei Maschinen dieser Art nähert sich die Kurve der EMK besonders dann außerordentlich der Sinoide, wenn kein Eisen im Innern der Ankerspulen enthalten ist. Der Energieaufwand für die Erzeugung des Magnetfeldes ist dann aber wegen des großen magnetischen Widerstandes des Weges der Kraftlinien sehr groß.

Nur für kleine Maschinen wird diese Konstruktion noch verwendet.

Große Verwandtschaft im äußeren Ansehen und in der Einrichtung mit der vorstehend beschriebenen Maschine zeigt

10. die ältere Wechselstrommaschine von Ferranti.

Auch bei dieser Maschine bewegt sich der Anker zwischen einem doppelten Kranze von Feldmagneten.

Der Anker besitzt jedoch eine doppelte Wellenwickelung aus Kupferband.¹⁾ Der Abstand zweier benachbarter Windungen ist der Ent-

¹⁾ Unabhängig von Ferranti hatte auch Sir W. Thomson zu gleicher Zeit, im Jahre 1882, den Vorschlag gemacht, eine solche Wellenwickelung für Scheibenanker zu verwenden.

fernung zweier Polmitten gleich. Die Entfernung der Pole voneinander ist nur so groß, als gerade zur Unterbringung der Erregerwicklung nötig ist (vergl. Fig. 145), sodaß eine sehr gute Ausnutzung der Wickelung und ein sehr einfacher Aufbau erzielt wird. Die Befestigung

dieser Wickelung auf der Ankerwelle durch einen Stern mit isolierten Bolzen wird durch die nebenstehende Fig. 144 veranschaulicht.

Es ist ohne weiteres einzusehen, daß eine derartige Anordnung der Wickelung sich nur für kleinere Maschinen eignet, auch nicht für hohe EM Kräfte verwendbar ist, da Windungen mit sehr verschiedener Spannung in große Nähe gebracht werden müssen. Ein Schadhafwerden der Isolation an einer Stelle macht das Abwickeln des ganzen Ankers bis zur verletzten Stelle nötig;

Ausbesserungen werden dadurch aufhältlich und kostspielig.

Ein besonderer Vorzug dieser Maschinen ist der geringe innere Widerstand und die niedrige Selbstinduktion des Ankers; infolge davon sind selbst bei ziemlich verschiedener Belastung die Änderungen der Klemmenspannung verhältnismäßig gering.

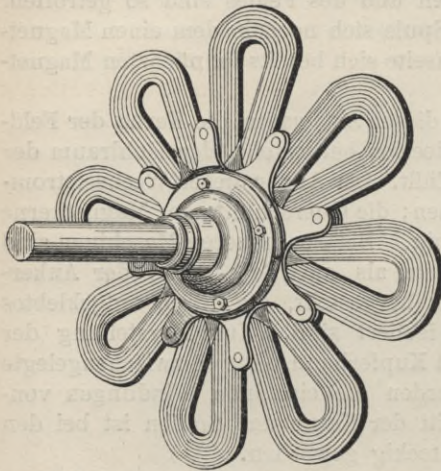


Fig. 144. Anker der älteren Wechselstrommaschine von Ferranti.

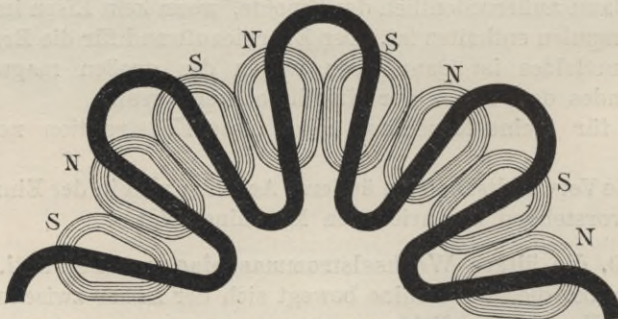


Fig. 145. Die Anordnung der Feldmagnete und Windungen bei der älteren Maschine von Ferranti.

11. Die neueren Wechselstrommaschinen von Ferranti

haben ebenfalls Scheibenanker, aber keine Wellenwicklung; es werden vielmehr wieder einzelne Spulen verwendet, die einzeln gewickelt

und paarweise an einem messingenen Spulhalter von der Form D (Fig. 146) befestigt werden. Zur Herstellung der Spulen dient gerunzeltes Kupferband; die einzelnen Windungen werden durch einen aufgepreßten Streifen von Isolationsmaterial voneinander getrennt. Das innere Ende der Wickelung ist mit dem aus Messingblättern hergestellten Kerne leitend verbunden. Die Spulen enthalten also kein Eisen. Die einzelnen Messingblätter des Kernes berühren sich unten und sind oben durch Asbest voneinander und von der Wickelung isoliert.

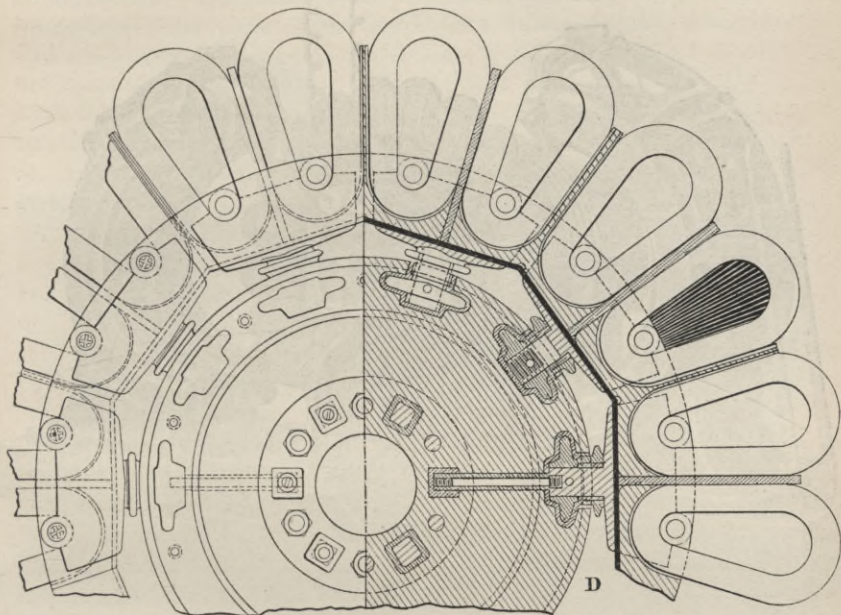


Fig. 146. Scheibenanker der neueren Maschine von Ferranti.

In zwei zu einem Paare gehörenden Spulen hat der Strom somit entgegengesetzte Richtung. Das äußere Ende jeder Spule ist mit dem äußeren Ende der Spule des benachbarten Paares verbunden. Die Befestigung der Spulen und die Isolation derselben voneinander und von den zusammenhängenden Metallteilen des Ankers ist mit größter Sorgfalt durchgeführt.

Jeder Spulhalter trägt außerdem einen kleinen Flügel, wodurch eine kräftige Luftbewegung bei der Rotation des Ankers veranlaßt wird. Diese Flügel sind in Fig. 147 zu sehen.

In den meisten Maschinen sind die Spulen der einen Ankerhälfte hintereinander und die so entstehenden zwei Gruppen parallel geschaltet.

Der Anker ist außerordentlich schmal, sodaß der Weg, den die magnetischen Kraftlinien in der Luft zu durchlaufen haben, verhältnismäßig kurz ist.

Die Erregung der Wickelung der Feldmagnete erfolgt durch den Strom einer kleinen Gleichstrommaschine, die gesondert angetrieben wird.

Der Stromabgeber ist ziemlich verwickelt konstruiert und wird, um eine Berührung desselben unmöglich zu machen, in einem Glas-

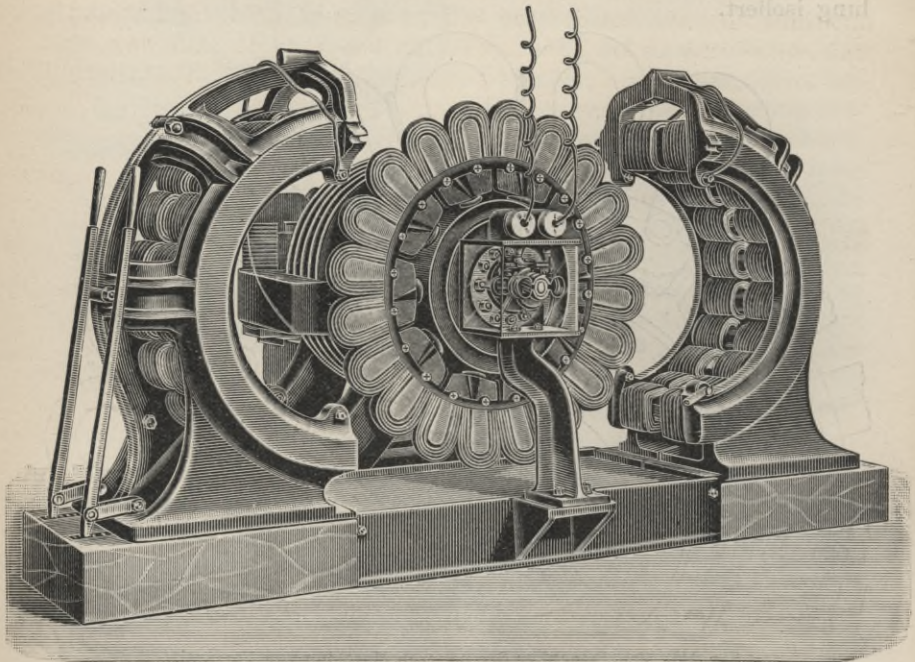


Fig. 147. Neuere Wechselstrommaschine von Ferranti.

kasten untergebracht, der sich an der einen Seite der Maschine befindet.¹⁾ Besondere Vorsicht war in dieser Hinsicht nötig, da z. B. die Maschinen, die in Größen bis zu 10000 Pferdestärken für den Betrieb der Deptforder Zentralstation nach diesem System gebaut worden sind, eine Klemmenspannung von 10000 Volt besitzen.

Jede Maschine hat 48 Spulen und ebensoviele beiderseitig gegenüber stehende Feldmagnete. Sowohl die gegenüber stehenden, als die benachbarten Feldmagnete haben ungleiche Polarität. Die Kerne der Feldmagnete sind auf zwei vertikal geteilten und durch Schrauben

¹⁾ Näheres findet man z. B. bei Silv. Thompson, Die dynamoelektrischen Maschinen, deutsch von Grahwinkel, Bd. II, S. 594.

zusammengehaltenen gußeisernen Ringen angeordnet. Die Hälften jedes Ringes können auf Schlitten zur Seite gerückt werden, wenn es nötig ist, den Anker für Ausbesserungsarbeiten freizulegen. Fig. 147 zeigt Anker und Feldmagnete, nachdem die Feldmagnetgruppen nach beiden Seiten herausgeschoben worden sind.

12. Die Wechselstrommaschine von Mordey,

die auch einen Scheibenanker hat, zeigt mehrere besondere Eigentümlichkeiten. Der Anker steht fest, die Feldmagnete rotieren. Alle Magnete auf der einen Seite des Ankers haben gleiche, die auf ver-

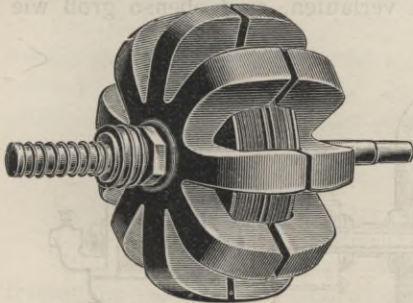


Fig. 148. Rotierende Feldmagnete der Wechselstrommaschine von Mordey.

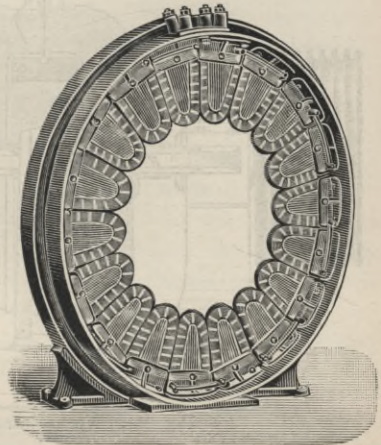


Fig. 149. Einzelne Spule der Mordeymaschine. Fig. 150. Anker der Mordeymaschine.

schiedenen Seiten des Ankers sich gegenüberstehenden Pole entgegengesetzte Polarität. Auf diese Weise ist es möglich, mit nur einer Erregerspule auszukommen, die entweder sich mit den Elektromagneten dreht oder feststehend angeordnet wird, während der Magnetkern sich in und um die Spule dreht.

Auf der Welle sitzt ein massiver eiserner Zylinder, von dem klauenartig geformte Fortsätze B (Fig. 151) ausgehen, die die Erregerspule C umfassen und sich von außen in der Mitte so weit nähern, daß zwischen ihnen die feststehenden Ankerspulen A gerade noch Platz finden. (Vergl. Fig. 148). Der Anker besteht aus einem aus zwei Teilen zusammengesetzten Ringe. Der zur Befestigung der Spulen dienende massive Teil des Ringes ragt über die Magnetfelder heraus, sodaß keine Wirbelströme in dem Metall desselben induziert werden. Die Spulen werden aus dünnem Kupferband mit isolierenden Zwischen-

lagen auf Kerne aus Porzellan gewickelt. Durch Halter und Schrauben aus Neusilber, das einen hohen Widerstand hat, sind die Spulen mit Futtern aus Hartgummi in dem Ringe befestigt. Die Enden jeder Wickelung sind außerhalb des Ringes durch Porzellanisolatoren geführt und passend miteinander verbunden. Fig. 149 zeigt die Gestalt einer einzelnen Spule. Damit nicht hohe Spannungsunterschiede zwischen benachbarten Windungen zweier verschiedener Spulen auftreten, sind die geradzahligen und die ungeradzahligen Spulen hintereinander und beide Gruppen parallel geschaltet. Fig. 150 gibt ein Bild von dem fertigen Anker. Die Zwischenräume zwischen den Polen, in welchen keine Kraftlinien verlaufen, sind ebenso groß wie

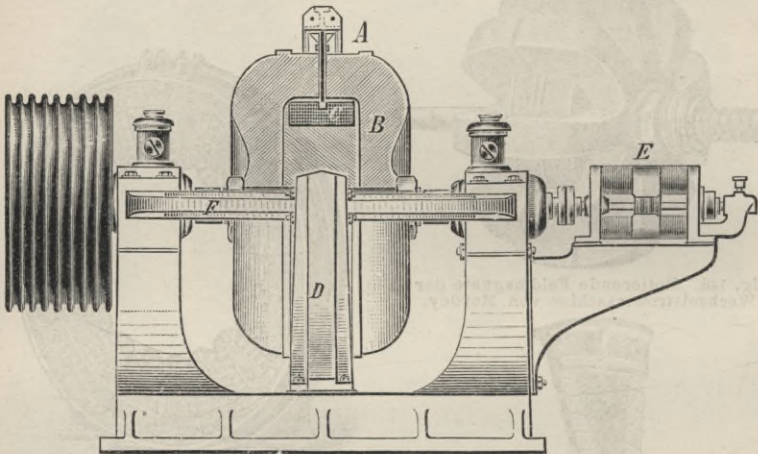


Fig. 151. Wechselstrommaschine von Mordey.

die Polflächen; die Spulen, deren doppelt so viel vorhanden sind als es Magnetfelder gibt, sind wenig kleiner als die Feldbreite.

Die Eisenmassen der rotierenden Feldmagnete wirken wie ein kräftiges Schwungrad und können unbedenklich mit großer Umlaufzahl rotieren.

Infolge der zweckmäßigen Anordnung der Feldmagnete ist der Energieverbrauch für die Erregung sehr gering, er beträgt meist nur 1,5 % der Leistung der Maschine; eine kleine Gleichstrommaschine mit Nebenschlußwicklung liefert den Erregerstrom. Der Strom wird der Magnetwicklung der Feldmagnete von zwei auf der Achse befestigten Ringen aus zugeführt. Diese Ringe sind durch biegsames Band aus Kupferdraht, das durch ein Gewicht gespannt wird, mit den Klemmen der Erregermaschine verbunden, wenn nicht, wie in Fig. 151, der Anker der Gleichstrommaschine E mit auf der Welle montiert ist. Wechselstrommaschinen dieser Art haben den großen

Vorteil, daß sie, weil Hysteresisverluste in dem eisenfreien Anker nicht auftreten, auch bei geringer Belastung noch einen guten Wirkungsgrad haben. Der Ankerwiderstand ist mäßig; bei einer Maschine für 2000 Volt und 37,5 Ampère Stromstärke, deren Feldmagnete in der

Minute 500 Umläufe machen, beträgt er z. B. nur 1,22 Ohm. Auch die Selbstinduktion ist gering. Maschinen dieser Art wären daher besonders für den Gebrauch in

Wechselstromzentralen geeignet. Für eine kleinere Maschine dieser Art zeigt das Diagramm, Fig. 152, in welcher Weise die Klemmenspannung sich ändert, wenn der Anker Ströme von wachsender Stärke liefert.

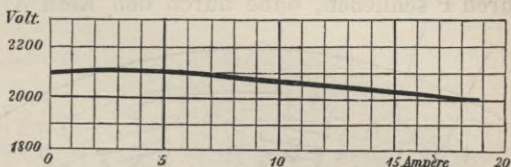


Fig. 152. Abhängigkeit der Klemmenspannung von der Ankerstromstärke bei einer Mordeymaschine.

D. Induktormaschinen.

Mit dem Namen Induktormaschinen bezeichnet man diejenigen zur Erzeugung von Wechselströmen aus mechanischer Arbeit bestimmten Vorrichtungen, bei denen durch Änderung des Weges der Kraftlinien Änderungen in der Anzahl der die Ankerspulen durchfließenden Kraftlinien hervorgebracht werden. Zumeist werden solche Maschinen derart hergestellt, daß sowohl der Anker als auch die Feldmagnete stillstehen, und nur ein rotierendes Eisenstück den Kraftlinien verschiedene Wege anweist.

Die erste derartige Maschine ist schon 1883 von Klimenko und eine wesentlich verbesserte 1887 von Mordey hergestellt worden.

Eine besonders leicht verständliche, wenn auch nicht übermäßig zweckmäßige Konstruktion dieser Art hat

13. die Wechselstrommaschine von Kingdon.

Aus aufeinander gelegten dünnen Eisenblechen ist ein feststehender Ring mit nach innen gekehrten Zähnen hergestellt (vergl. Fig. 153). Die ungeradzahligten Zähne A, A, A . . . tragen die hintereinander geschalteten Ankerspulen, die geradzahligten Zähne F, F, F bilden die Pole der Feldmagnete von abwechselnd entgegengesetzter Richtung der Kraftlinien.

Innerhalb dieses Ringes dreht sich ein Zylinder aus nichtmagnetischem Materiale, der auf seinem äußeren Umfange eigentümlich geformte, aus isolierten Blechscheiben hergestellte Eisenkörper PP trägt.

In der Stellung I (Fig. 154) z. B. verlaufen die Kraftlinien im Eisenkern der Ankerspule A in der durch die Pfeile angedeuteten Richtung. Bei weiterer Drehung (Stellung II) gelangt das Eisenstück P in eine Lage, in der die Kraftlinien der Pole N und S sich durch P schließen, ohne durch den Kern A der Ankerspule hindurch zu gehen. Rückt der die Eisenkern tragende Zylinder noch weiter, so verlaufen nunmehr (Stellung III) die Kraftlinien in der entgegengesetzten Richtung durch A, wie sie dies in der Stellung I taten.

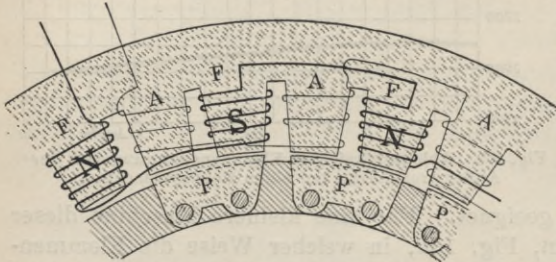


Fig. 153. Anordnung der Induktormaschine von Kingdon. Durch diesen Wechsel in der Richtung und der Anzahl der den Kern A der Spule durchdringenden Kraftlinien wird in den Windungen der Spule ein Wechselstrom induziert.

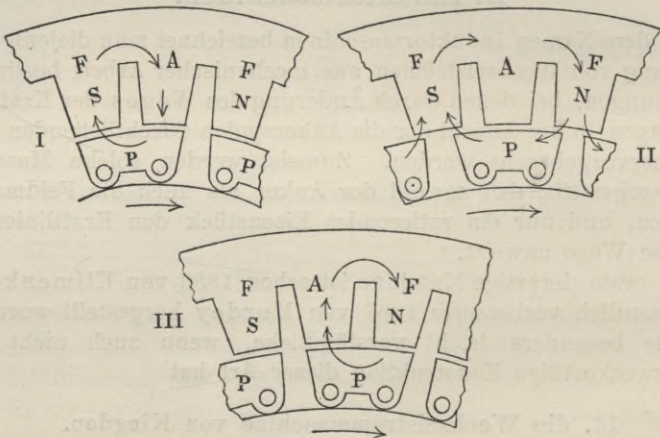


Fig. 154. Der Wechsel der Kraftlinienrichtung in den Ankerkernen AA der Kingdonmaschine.

Erhebliche Verluste durch Hysteresis sind bei diesen Konstruktionen auch nicht durch die Verwendung geblätterter Magnete zu vermeiden.

Als ein großer Vorzug dieser Anordnung muß es jedoch angesehen werden, daß keine stromführenden Drähte, sondern nur Eisenmassen PP rotieren.

14. Allgemeines über die eigentlichen Induktormaschinen.

Während die Kingdonmaschine (1890) noch als ein Vorläufer der eigentlichen Induktormaschinen angesehen werden muß, haben

wenig später die Konstrukteure der Compagnie de l'Industrie électrique (Système Thury) in Genf eine durchaus brauchbare und zweckmäßige Form geschaffen. Die Anordnung wird durch nebenstehende Fig. 155 erläutert.

Auf der Welle $L_1 L_2$ ist ein glockenartig geformtes massives Eisenstück festgekeilt, dessen nach der Achse zu gewendete Innenseite gezahnt ist. Dieser Eisenkörper dreht sich in einem feststehenden Stahlringe, der einen Querschnitt hat, der einem C ähnelt. Durch eine große, feststehende Spule S, die sich innerhalb dieses Ringes befindet, wird z. B. die linke Seite des Ringes nordmagnetisch, die rechte süd magnetisch. Die Kraftlinien (in Fig. 155 durch die gestrichelte Linie angedeutet) verlaufen dann von A über A_1 und A_2 , überschreiten den äußerst schmalen Luftraum zwischen den glatten Zylinderflächen A_2 und B,

werden verteilt durch die Zähne ZZ, die sich an B befinden, und treten in die Oberfläche des eigentlichen Ankers A ein. Die Oberfläche des Ankers besteht aus geblättertem Eisen, und auf derselben befinden sich die eigentlichen Ankerspulen,

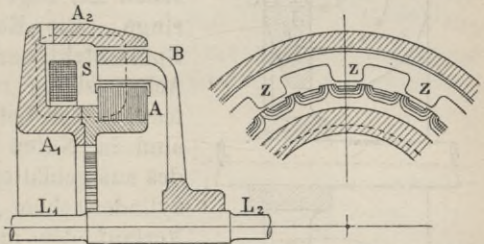


Fig. 155. Ältere Induktormaschine der Compagnie de l'Industrie électrique (System Thury).

deren doppelt so viele vorhanden sind, als es Zähne an B gibt.

Wenn nun ein Zahn vor einer Ankerspule A steht, gehen Kraftlinien durch die Spule hindurch, wenn der Zahn weiterrückt, vermindert sich die Zahl der Linien, und wird nahezu gleich null, wenn eine Lücke sich vor der Spule befindet. In der Ankerspule wird durch diese Änderung der Kraftlinienzahl ein Wechselstrom induziert.

Da Wechselströme in massivem Eisen nur in geringer Menge induziert werden, wenn eine gezahnte magnetische Fläche an einer glatten Eisenfläche hingeleitet, und Änderungen der Kraftlinienzahl nur in dem geblätterten Teile A des Ankerringes stattfinden, sind die Verluste durch Foucaultströme und durch Hysteresis nur gering. Da der Kraftlinienweg sehr kurz und die Luftzwischenräume bei B und A sehr klein sein können, bei B außerdem die Kraftlindichte gering ist, fällt der Energieaufwand für Magnetisierung nur sehr gering aus (1% bis $\frac{1}{3}$ % der Leistung der Maschine).

Infolge der großen Kraftlinienzahl, die durch jeden Zahn hindurchgeht, können die Ankerspulen aus wenig Windungen bestehen, dadurch wird der innere Widerstand des Ankers gering. Die Selbstinduktion wird gering sein wegen der niedrigen Windungszahl und wegen der Anordnung der Spulen auf der Ankeroberfläche. Kräftiges

Feld, geringer innerer Widerstand, niedrige Selbstinduktion sind die Bedingungen, welche solche Maschinen sowohl zur Parallelschaltung als besonders auch zum Motorbetriebe geeignet erscheinen lassen. Der Unterschied in der Stärke des Erregerstromes zwischen Leerlauf und Vollbelastung kann auf 5 % und noch weniger herabgebracht werden.

Eine etwas abgeänderte Form ist im Jahre 1894 von den damaligen Ingenieuren der Maschinenfabrik Oerlikon (den Herren E. Arnold und E. Kolben) vorgeschlagen und zur Ausführung gebracht worden.

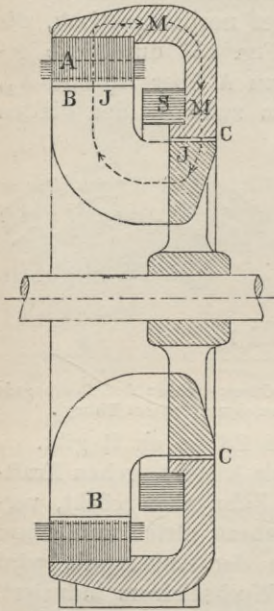


Fig. 156. Induktormaschine der Maschinenfabrik Oerlikon.

Die Erregerspule S, deren (schraffiert gezeichneter) Querschnitt in der Fig. 156 zu sehen ist, liegt in dem feststehenden Anker- ringe. Die Ebene der Windungen dieser Spule steht senkrecht zur Achse. Auf der Achse ist der rotierende Eisenkörper JJ befestigt, der bei B gezahnt ist. Die Spulen sind in Nuten mit übergreifenden Zähnen des aus geblätterttem Eisen hergestellten hohl- zylindrischen Ankers A eingebettet. Der Verlauf der mittleren Kraftlinie ist oben mit einer gestrichelten Linien eingezeichnet. Zwischen A und B und dann bei C haben die Kraftlinien Lufträume zu überschreiten. Beide Zwischenräume können aber sehr eng gewählt werden, und bei C, wo sich zwei glatte Eisenflächen gegenüber- stehen, ist außerdem die Kraftliniendichte gering.

Es gibt doppelt soviel Spulen im Anker A, als Zacken bei B vorhanden sind. Die Spulen werden über Schablonen fertig gewickelt, in die halboffenen Nuten des Ankereisens eingelegt und dort gut isoliert und befestigt. Der Ring, der die Anker- spulen trägt, kann in mehrere Segmente zerlegt werden, die durch Verschraubungen zusammengehalten werden.

Es hat sich in der Praxis als vorteilhaft herausgestellt, die Oberfläche der Zähne des rotierenden Eisenstückes JJ bei B eben- falls aus geblätterttem Eisen herzustellen, da sonst diese Vorsprünge durch Wirbelströme stark erwärmt werden.

E. Arnold¹⁾ hat gezeigt, daß für einphasigen Wechselstrom die

¹⁾ ETZ 1895, Bd. XVI, S. 140.

in Fig. 157 gewählte Anordnung der Spulen und Zacken des Eisenkörpers die zweckmäßigste ist. Es ist in diesem Falle:¹⁾

$$\frac{b}{d} = 0,5 \quad \frac{s}{d} = 0,5$$

und der Koeffizient k (vergl. Kap. 11, 11., S. 155) hat demnach für jeden der beiden in den Spulengruppen 1 und 2 induzierten Wechselströme nach Kapp den Wert $k = 2,31$. Diese beiden Wechselströme sind aber gegeneinander um 90° in der Phase verschoben, und in jeder Phase kommt nur die Hälfte der wirk- samen Drähte zur Wirkung. Durch Hintereinanderschaltung beider Spulengruppen entsteht somit ein einphasiger Wechselstrom, dessen EMK

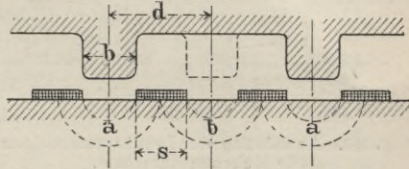


Fig. 157. Anordnung der Spulen und Pole bei Induktormaschinen für Wechselstrom.

$$E = \frac{e \cdot \sqrt{2}}{2} = \frac{e}{\sqrt{2}} \quad \dots \quad 4)$$

ist, wenn e die EMK ist, die erhalten worden wäre, wenn zwischen zwei gleichsinnigen Polen noch ein Pol entgegengesetzten Vorzeichens (in der Figur 157 gestrichelt gezeichnet) vorhanden gewesen wäre und alle Drähte zur Erzeugung eines Stromes gedient hätten. Der Wert k wird daher bei der Induktormaschine

$$k = \frac{2,31}{\sqrt{2}} = 1,64.$$

Bei gleicher Kraftlinienzahl für jeden Pol wäre somit die EMK einer mehrpoligen einphasigen Wechselstrommaschine mit doppelter Polzahl bei derselben Drahtzahl, Polbreite, Armaturlänge und Umfangsgeschwindigkeit $\sqrt{2}$ mal größer als die einer Induktormaschine. Man kann aber wegen der Kürze des Kraftlinienweges in der Induktormaschine die Kraftliniendichte größer wählen, auch die Pole etwas breiter machen und dadurch die Kraftlinienzahl erhöhen, und endlich kann man unbedenklich einem massiven Eisenkörper größere Umlaufgeschwindigkeit geben als einem mit Spulen besetzten Sterne von Elektromagneten.

Bei Mehrphasenmaschinen gestaltet sich das Verhältnis günstiger für die Induktormaschinen. Benutzt man die in Fig. 158 gezeichnete Anordnung für eine Zweiphasenmaschine, indem man sowohl die Spulen a als die Spulengruppe b jede für sich hintereinander schaltet und zu getrennten Klemmen führt, so ist für jeden Stromkreis $k = 2,31$. Derselbe Wert von k gilt, wenn (Fig. 158) die Maschine als Dreiphasen-

¹⁾ Da Pole gleichen Vorzeichens sich folgen, wie bei der Mordeymaschine (S. 80 u. S. 133), so ist für d der halbe Abstand zweier Pole einzusetzen.

maschine für drei Spulengruppen a, b, c benutzt wird, für die EMK jeder Phase.

Daher kommt es, daß Induktormaschinen für einphasigen Wechselstrom etwas schwerer, für mehrphasigen Strom aber etwas leichter ausfallen, als mehrpolige Wechselstrommaschinen für gleiche Leistung und gleiche Beanspruchung des Materiales.

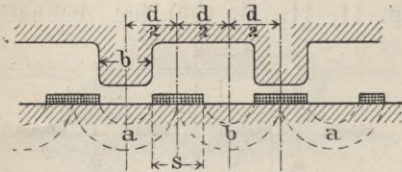


Fig. 158. Anordnung der Induktormaschinen für Mehrphasenströme.

Der große Vorteil der Induktormaschinen aber ist der, daß alle vom Strom durchlaufenen Leiter an diesen Maschinen ruhen und nur ein Eisenkörper rotiert. Der für die Erregung des Feldes erforderliche Aufwand ist sehr gering, sowohl hinsichtlich des Energieverbrauches als hinsichtlich der erforderlichen Kupfermenge. Infolge des kräftigen Magnetfeldes kann man mit wenigen Ankerwindungen auskommen; dadurch wird die Selbstinduktion und der Spannungsabfall solcher Maschinen gering.

Die Hysteresisverluste halten sich ebenfalls in niedrigen Grenzen, da nur in einem kleinen Teile der

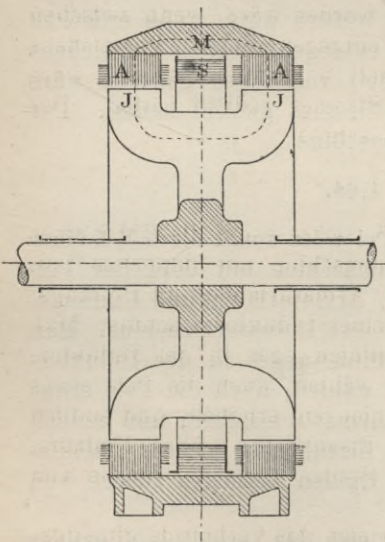


Fig. 159. Neuere Induktormaschine der Maschinenfabrik Oerlikon.

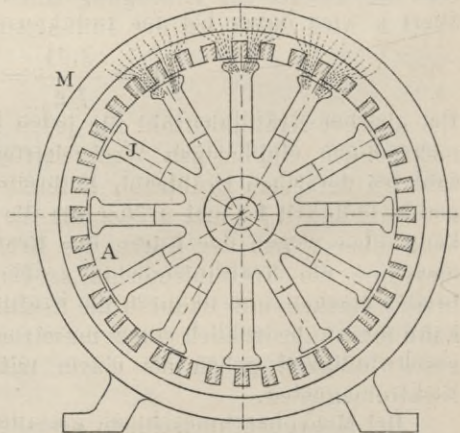


Fig. 160. Vordere Ansicht einer Induktormaschine der Maschinenfabrik Oerlikon.

Eisenmassen der Magnetismus Änderungen erfährt. Der Wirkungsgrad solcher Maschinen ist daher sehr hoch.

Die Einführung der Induktormaschinen, die von der Maschinenfabrik Oerlikon, der Allgemeinen Elektrizitätsgesellschaft von Brown & Boveri und mehreren anderen Gesellschaften kräftig

in die Hand genommen worden ist, bezeichnet einen Fortschritt im Baue der Wechselstrommaschinen.

Der Umstand, daß derartige Maschinen fast keine Bedienung erfordern, und eigentlich kein Teil an ihnen reparaturbedürftig werden kann, läßt sie auch besonders geeignet erscheinen als Synchronmotoren verwendet zu werden.

15. Die Induktormaschinen der Allgemeinen Elektrizitätsgesellschaft und der Maschinenfabrik Oerlikon.

Eine andere Art von Wechselstrommaschinen dieser beiden Firmen enthält zwei Kränze von Ankerspulen, die in Nuten mit stark übergreifenden Zähnen eines hohlzylindrischen, aus Eisenblechen hergestellten Ankerkörpers AA eingefügt sind. Dieser geblätterte Eisenkörper ist in einem ruhenden ringförmigen Mantel M (vergl. Fig. 159)

aus weichem Stahl befestigt.

Die am Mantel M befestigte kreisförmige Spule S dient zur Erregung des Magnetfeldes. Innerhalb des Ankers rotiert ein auf der Drehachse festgekeilter Eisenkörper J, der ähnlich wie ein Zahnrad geformt ist (vergl. Fig. 161).

Die dem Anker zugewendeten Polflächen sind, um die Bildung von Wirbelströmen auszuschließen, bei JJ aus geblättertem Eisen hergestellt.

Die gestrichelte Linie in dem oberen Teile der Fig. 159 u. 160 läßt den Weg, den die Kraftlinien nehmen, erkennen. Mit den Polhörnern rotieren die an deren Oberfläche gehefteten Kraftlinienfelder, und diese rufen, während sie an der Oberfläche der Spulen vorüberschreiten, in den Windungen Induktionsströme hervor. (Fig. 160.)

Die Figur 161 zeigt die sehr ähnliche, aber in Einzelheiten doch etwas abweichende Anordnung, die von der Allgemeinen Elektrizitätsgesellschaft in Berlin dieser Form von Induktormaschinen gegeben worden ist.

Der zur Felderregung erforderliche Gleichstrom wird durch eine kleine Gleichstrommaschine G geliefert, deren Anker an der Maschinenwelle fliegend befestigt ist.

Die Abbildungen Fig. 162 und Fig. 163 zeigen die äußeren Erscheinungen solcher Maschinen, einer kleineren und einer größeren, in den tatsächlich ausgeführten Formen, wie sie zur Zeit von der Maschinenfabrik Oerlikon gebaut werden. Die nachfolgenden Fig. 164



Fig. 161. Induktormaschine der A. E. G. (Modell O).

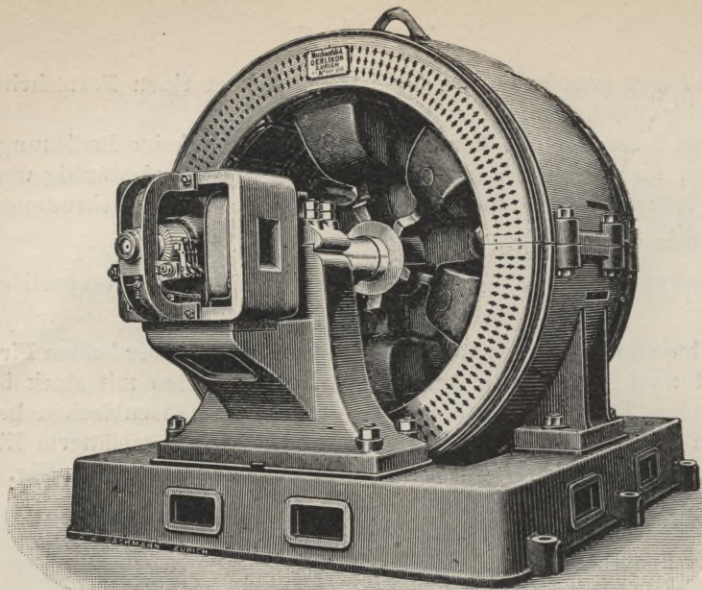


Fig. 162. Induktormaschine der Maschinenfabrik Oerlikon.

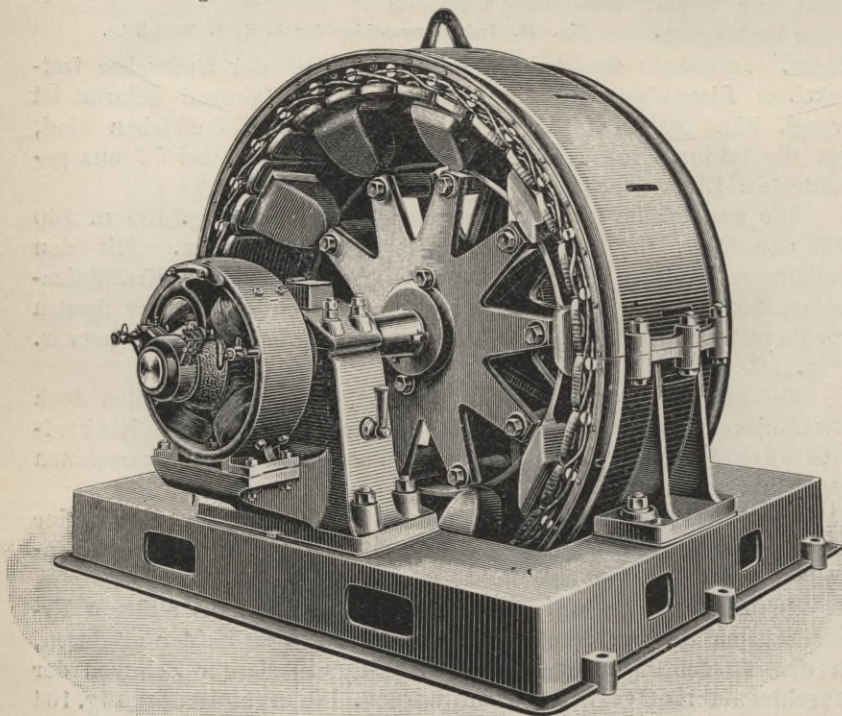


Fig. 163. Größere Induktormaschine der Maschinenfabrik Oerlikon.

und 165 stellen die drehenden Eisenkörper gesondert dar, nachdem sie aus den Maschinen herausgenommen worden sind.

Die Verhältnisse der Abmessungen der kleineren der beiden dargestellten Maschinen sind an den beigefügten Durchschnitten Fig. 166 a und b zu ersehen.

An den Maschinen kann es auffallen, daß keine Klemmen zur Abführung des Stromes zu sehen sind. Diese Klemmen sind nämlich am unteren Teile des Maschinengestelles an-

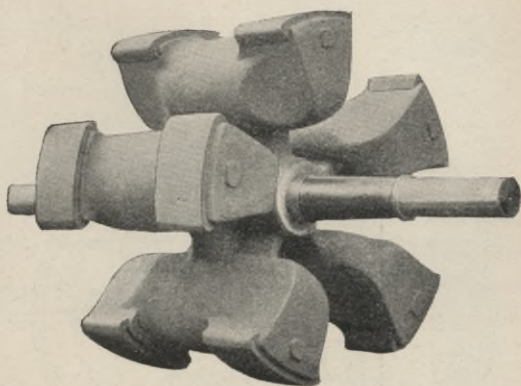


Fig. 164. Der rotierende Eisenkörper der kleineren Induktormaschine.

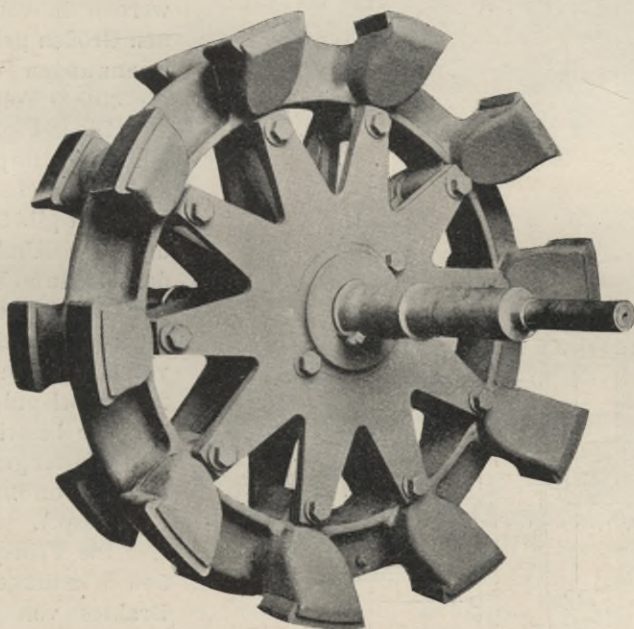


Fig. 165. Rotierender Eisenkörper der größeren Induktormaschine.

gebracht, um jede Berührung durch Unbefugte unmöglich zu machen. Die Gehäuse der Maschinen sind zweiteilig; nach Lösung der Schalt-

drähte, durch welche die an der Trennungsstelle gelegenen Spulen verbunden sind, können durch Abheben der oberen Hälfte des Ankers alle im Innern gelegenen Teile leicht zugänglich gemacht werden.

Die Wellen sind aus Stahl hergestellt, die Zapfen gehärtet; die Lager besitzen selbsttätige Ringschmierung. Es gibt also an diesen Maschinen eigentlich keine Teile, die eine Bedienung erforderten oder eine merkliche Abnutzung erleiden könnten.

Derartige Maschinen werden in verschiedenen Größen gebaut für Spannungen von 200 bis 30000 Volt.

Die in Fig. 166 abgebildete 100 pferdige, kleinere Wechselstrommaschine gibt 3900 Volt und bei 500 Umläufen in der Minute 50 Wechsel. Der Anker hat einen inneren Durchmesser von 830 mm und trägt 24 Doppelspulen; jede Spule besteht aus 38 Windungen eines Drahtes von 3 mm Dicke (3,6 besp.).

Die Feldspule hat 546 Windungen eines Drahtes von 4,5 mm Durchmesser (4,9 besp.). Bei Vollbelastung ist ein Erregerstrom von 10,5 Ampère Stärke bei 90 Volt Klemmenspannung erforderlich.

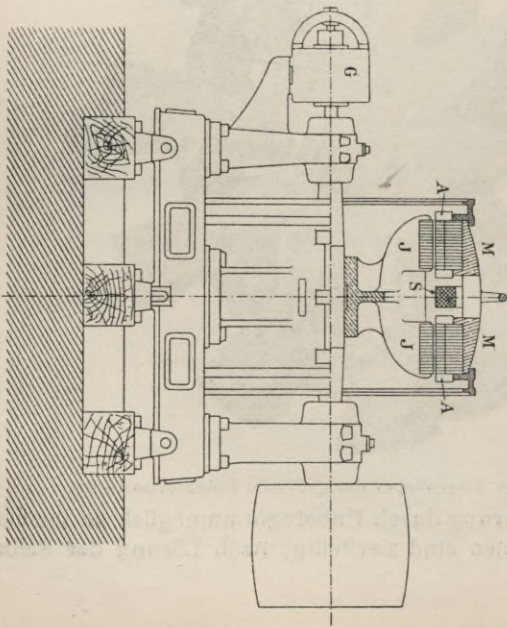
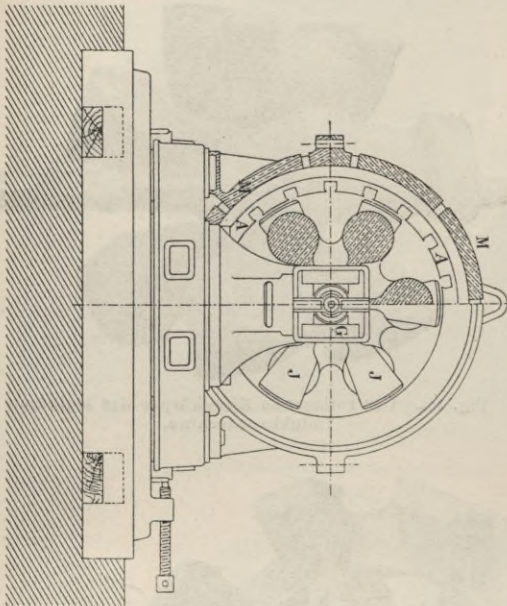


Fig. 166 a.
Durchschnitt durch die kleinere Induktormaschine der Maschinenfabrik Oerlikon.

Fig. 166 b.

Wenn besonders niedrige Umlaufzahlen erwünscht sind, gibt die Allgemeine Elektrizitätsgesellschaft dem Anker einen größeren Durchmesser und eine geringere Breite und läßt zwischen zwei übereinander stehenden Ankeroberflächen AA einen von der Seite her eingreifenden Kranz von Polstücken P umlaufen (vergl. Fig. 167), die unmittelbar an dem Schwungrade der Dampfmaschine befestigt sind. Die Spulen AA sind wiederum in die Oberfläche zweier Ankereisen versenkt, die aus einzelnen voneinander isolierten Blechstücken hergestellt sind; diese beiden Ankereisen werden von einem aus Stahlguß hergestellten, ruhenden, massiven Körper MM getragen.

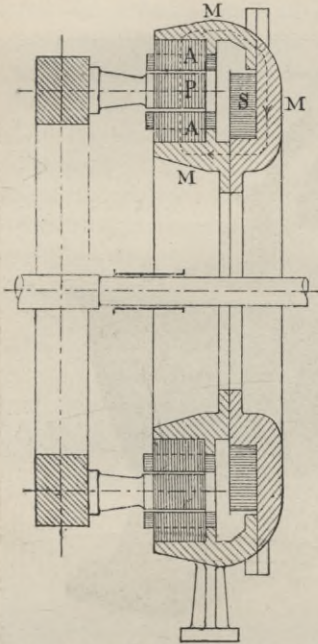


Fig. 167. Induktormaschine der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft für niedrige Umlaufzahlen.

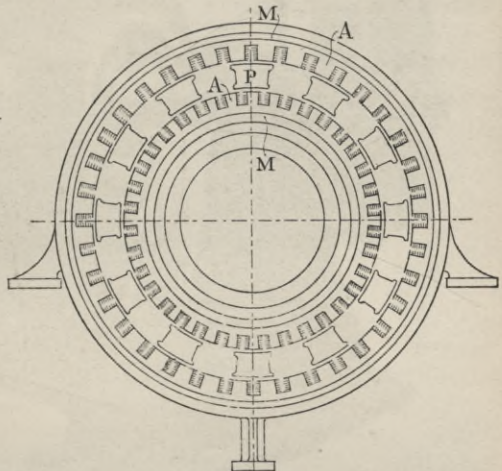


Fig. 168. Durchschnitt durch die Induktormaschine der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft.

Der mittlere Weg der durch die Erregerspule S erzeugten Kraftlinien ist durch die punktierte Linie in dem oberen Teile der Figur 167 angedeutet.

Die Figur 168 zeigt einen Durchschnitt durch dieselbe Maschine, aus dem man die Gestalt und Größe der Polstücke PP ersehen kann.

Infolge der Drehung der Polstücke P wandern die Kraftlinienfelder längs der Ankeroberfläche hin und induzieren in den Spulenwindungen Wechselströme.

Große Maschinen mit dieser Anordnung der Spulen und rotierenden Polstücken haben sich in verschiedenen Elektrizitätswerken gut bewährt.

Eine größere derartige Maschine der A. E.-G., die allerdings zur Erzeugung von dreiphasigem Wechselstrom bestimmt ist, macht 167 Umläufe in der Minute und liefert 50 volle Perioden in einer Sekunde. Jeder Ankerring hat 54 Spulen und dementsprechend gibt es (vergl. S. 175, Fig. 114) 18 Polstücke P, P, . . . Wenn, wie im vorliegenden Falle, die Spannung in jeder Stromphase 2900 Volt, die verkettete Spannung der drei Phasen 5000 Volt und die Strom-

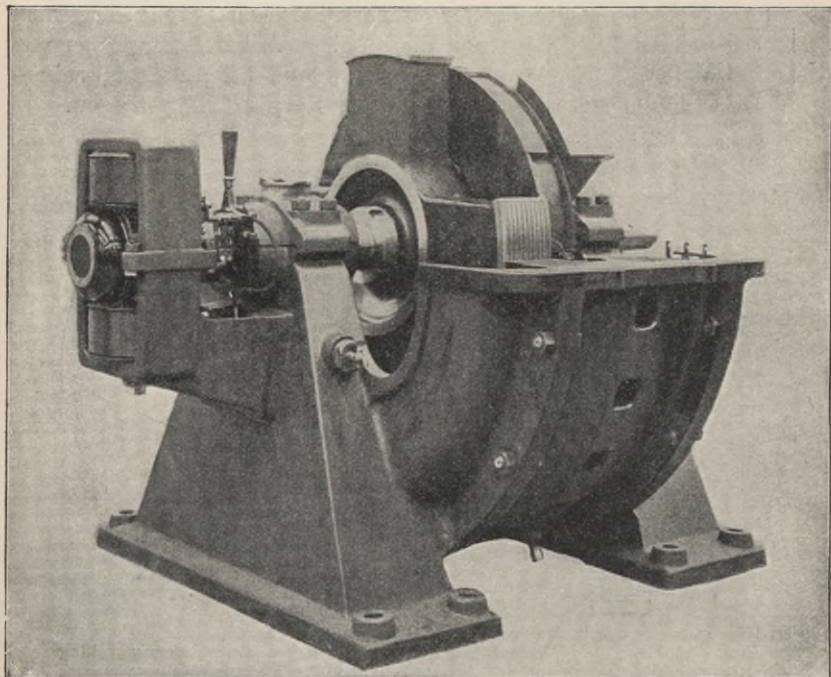


Fig. 169.

Wechselstrommaschine der Induktortype von Brown, Boveri & Cie.

stärke in jedem der drei Stromkreise 28 Ampère betragen soll, besteht jede Ankerspule aus 24 Windungen eines Drahtes von 3,2 mm (besponnen 3,7 mm); der Widerstand der je 36 hintereinander geschalteten Ankerspulen beträgt (warm) 2,5 Ohm. Die eine Feldspule S besteht aus 260 Windungen eines Drahtes von 7 mm Durchmesser (besponnen 7,5 mm) und hat einen Widerstand von 1 Ohm. Als Erregerstrom sind bei Vollbelastung 60 Ampère bei 65 Volt erforderlich. Der Durchmesser des Ringes M dieser Maschine beträgt 317 cm.

16. Induktormaschine von Brown, Boveri & Co.

Diese Maschine zeigt eine von den vorher beschriebenen Konstruktionen nicht unwesentlich abweichende Einrichtung. Der rotierende Eisenkörper besteht aus zwei um 45° gegeneinander versetzten vierstrahligen Sternen (vergl. Fig. 169); die Polschuhe auf der einen Seite entsprechen immer den Zwischenräumen auf der anderen Seite. Der feststehende Anker der Maschine besteht aus zwei Teilen, von denen jeder Teil einer Hälfte des rotierenden Magnetfeldes gegenübersteht. Die Endflächen, die an den beiden Ankerflächen sich vorüber bewegen, sind aus geblättertem Eisen gebildet.

Die Magnetisierung erfolgt durch eine zwischen diesen Sternen befindliche feststehende Spule, die an vier Stellen von außen gehalten wird; den zur Erregung erforderlichen Strom liefert eine kleine Gleichstrommaschine, deren Anker mit der Welle der Wechselstrommaschine direkt gekuppelt ist.

Diese Konstruktion wird besonders bei ungewöhnlichen Umlaufzahlen verwendet.

Der Kraftlinienweg im Eisen ist bei dieser Anordnung etwas länger als bei den früher beschriebenen Induktormaschinen.

17. Allgemeine Bemerkungen über Induktormaschinen.

Vor einigen Jahren schien es, als würde die Induktortype für größere Wechselstrom- und Drehstrommaschinen um ihrer vorher (S. 212) erwähnten Vorteile willen künftig vorzugsweise zur Anwendung kommen. Es hat sich jedoch gezeigt, daß sie bei gleicher Leistung und Umfangsgeschwindigkeit etwas teurer und schwerer wird als die Wechsepoltype. Außerdem bereitet die Aufbringung der großen Erregerspule erhebliche Schwierigkeiten. Ferner ist wegen der großen Eisenoberflächen und hohen magnetischen Sättigung die Streuung ziemlich erheblich.

In Verbindung mit raschlaufenden Dampfmaschinen z. B. Dampfturbinen wird jedoch auch weiterhin diese Maschinengattung ihre Bedeutung behalten.

Die Spannungskurven der Induktortype sind unsymmetrisch und enthalten höhere Harmonische mit $\sin 2 \omega t$, $\sin 4 \omega t$ usw. (vergl. S. 127) und dies veranlaßt leicht Schwierigkeiten, wenn man solche Maschinen mit anderen parallel schalten will.

13. Kapitel.

Drehstrommaschinen.

1. Allgemeines über Mehrphasenmaschinen.

Die Maschinen zur Erzeugung von mehrphasigem Wechselstrom unterscheiden sich im allgemeinen Aufbau nur wenig oder gar nicht von den gewöhnlichen Wechselstrommaschinen. Der Anker muß nur derart eingerichtet sein, daß er eine Wickelung besitzt, die sich in mehrere Abteilungen trennen läßt, die während der vollen Periode eines Wechselstromes zu verschiedenen Zeiten in Tätigkeit treten.

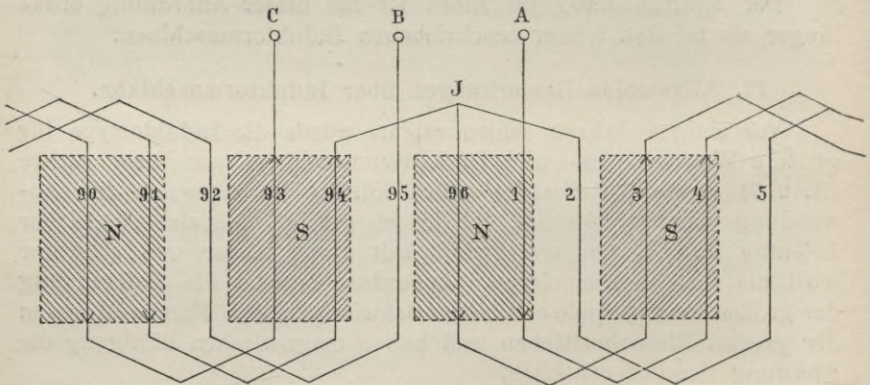


Fig. 170. Wellenwicklung für Dreiphasenstrom.

Am leichtesten läßt sich das verstehen, wenn wir die Wickelung einer mehrpoligen Maschine mit Trommelanker betrachten, obgleich man Maschinen für Mehrphasenstrom nach jeder Type, sowohl mit Ring-, Trommel-, Scheibenanker, als auch als Maschinen mit Polanker oder als Induktormaschinen bauen kann. Die nebenstehende Fig. 170 stellt z. B. eine Wellenwicklung für Dreiphasenstrom oder Drehstrom dar. Der Abstand der drei Wickelungen A, B und C voneinander beträgt gerade $\frac{1}{3}$ des Abstandes der Mitten gleicher Pole, B gelangt somit um $\frac{1}{3}$ Welle oder um 120° später zum Maximum der Induktion oder in die Lage, in der die Induktion null ist, als A; die Wickelung C gelangt um denselben Unterschied später in die ent-

sprechenden Lagen als B. Es wird somit in jeder der drei um $\frac{1}{3}$ Teilung versetzten Wickelungen ein Wechselstrom induziert; jeder dieser drei Wechselströme zeigt gegen die anderen einen Phasenunterschied von 120° .

In einem Punkte, dem Nullpunkte oder neutralen Punkte, in der Figur mit J bezeichnet, sind die drei Wellenwickelungen miteinander verbunden; die drei anderen Enden der Wickelung sind zu drei Schleifringen geführt, von denen sie durch drei Schleiffedern abgenommen und durch drei Leitungen an die Verwendungsstelle geführt werden.

Die Summe solcher mehrphasiger Wechselströme von gleicher Stärke ist immer null, wie die nachfolgende Rechnung zeigt, sodaß die Rückleitungen gespart werden können, weil die beiden anderen Leitungsdrähte in jedem Augenblicke zusammen als Rückleitung für den in der dritten Leitung fließenden Strom dienen. Ist der in der Leitung A fließende Strom:

$$J_A = J_0 \cdot \sin \omega t \dots\dots\dots 1)$$

so ist der in Leitung B gleichzeitig fließende Strom

$$J_B = J_0 \cdot \sin \left(\omega t + \frac{2\pi}{3} \right) \dots\dots\dots 2)$$

und der in C fließende:

$$J_C = J_0 \cdot \sin \left(\omega t + \frac{4\pi}{3} \right) \dots\dots\dots 3)$$

Dann ist:

$$J_A + J_B + J_C = J_0 \cdot \left[\sin \omega t + \sin \left(\omega t + \frac{2\pi}{3} \right) + \sin \left(\omega t + \frac{4\pi}{3} \right) \right] \dots\dots 4)$$

Entwickelt man die Sinus der Winkelsummen nach den bekannten goniometrischen Formeln, so erhält man:

$$J_A + J_B + J_C = J_0 \cdot \left[\sin \omega t + \sin \omega t \cdot \cos \frac{2\pi}{3} + \cos \omega t \cdot \sin \frac{2\pi}{3} + \sin \omega t \cdot \cos \frac{4\pi}{3} + \cos \omega t \cdot \sin \frac{4\pi}{3} \right]$$

Beachtet man nun, daß:

$$\sin \frac{2\pi}{3} = \sin 120^\circ = +\frac{1}{2}\sqrt{3} \quad \cos \frac{2\pi}{3} = \cos 120^\circ = -\frac{1}{2}$$

$$\sin \frac{4\pi}{3} = \sin 240^\circ = -\frac{1}{2}\sqrt{3} \quad \cos \frac{4\pi}{3} = \cos 240^\circ = -\frac{1}{2}$$

ist, so ergibt sich:

$$J_A + J_B + J_C = J_0 \cdot (\sin \omega t - \frac{1}{2} \sin \omega t + \frac{1}{2}\sqrt{3} \cos \omega t - \frac{1}{2} \sin \omega t - \frac{1}{2}\sqrt{3} \cos \omega t) = 0 \quad 5)$$

Die Schaltung der der Induktion unterworfenen drei Gruppen von Leitern in einer Mehrphasen-Wechselstrommaschine, die wir oben durch

das Wickelungsschema veranschaulicht haben, ist dadurch charakterisiert, daß je ein Ende eines solchen Leitersystems mit der Außenleitung, die anderen Enden aber unter sich verbunden sind. Diese Schaltung, die durch Fig. 171 dargestellt wird, heißt offene Schaltung oder Sternschaltung. Statt Schaltung wird gelegentlich wohl auch der Ausdruck Verkettung gebraucht.

Sind aber die drei Phasenströme wesentlich verschieden, so wird bei dieser Schaltung auch ein vierter Ausgleichleiter gebraucht, durch den die Vereinigungspunkte zweier mit Sternschaltung versehenen Maschinen oder Transformatoren miteinander verbunden werden. (Vergl. Fig. 172.)

Man kann aber auch das Ende des einen der drei Leitersysteme des Ankers mit dem Anfange des nächsten verbinden und die Leitungen, die nach außen führen, von diesen Verzweigungspunkten ausgehen lassen. (Vergl. Fig. 173.) Dann spricht man von geschlossener

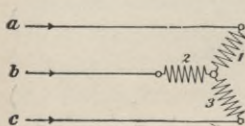


Fig. 171. Sternschaltung bei Dreiphasenmaschinen.

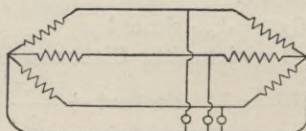


Fig. 172. Sternschaltung mit einem vierten Ausgleichleiter.

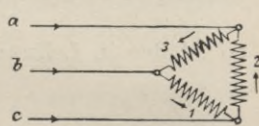


Fig. 173. Dreieckschaltung bei Dreiphasenmaschinen.

Schaltung, von Dreieckschaltung oder Ringschaltung. Einen vierten, neutralen Ausgleichsleiter gibt es bei dieser Art der Verkettung nicht.

Sternschaltung mit neutralem Leiter kommt besonders zur Anwendung, wenn keine Transformation der Ströme stattfindet, also z. B. bei Energieübertragungen mit Dreiphasenströmen auf kürzere Entfernungen. Die Dreieckschaltung wird vorzugsweise benutzt, wenn die Ströme nach ihrer Erzeugung transformiert, dann weithin fortgeleitet, wieder transformiert und nun erst verwendet werden.

Früher wurden vielfach für Zwecke der Übertragung und Verteilung elektrischer Energie auf weite Entfernungen Wechselstrommaschinen für geringe Spannungen und hohe Stromstärken verwendet; durch Transformatoren wurden die Ströme derselben in solche von hoher Spannung und geringer Stromstärke verwandelt, hierauf diese hochgespannten Ströme weithin an die Verwendungsstellen fortgeleitet, dort wieder durch Transformatoren in starke Ströme von niedriger Spannung umgesetzt und in dieser Form den Lampen und Elektromotoren zugeführt.

Da aber jede Transformation mit einem Verluste an Energie von einigen Prozenten erkauft werden muß, der verschieden große Spannungsabfall der Transformatoren bei ungleicher Belastung den

Betrieb erschwert, und die Preise der Transformatoren ziemlich hoch sind, hat man dieses System, nach dem z. B. seiner Zeit die denkwürdige Arbeitsübertragung von Lauffen nach Frankfurt a. M. durchgeführt war, mehr und mehr verlassen.

Neuere Versuche, zumal solche, die von der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft in Berlin zur Vorbereitung ihrer gewaltigen Kraftübertragungswerke in Rheinfeldern gemacht worden waren, hatten gezeigt, daß es unter Benutzung der neueren Isolationsmaterialien, zumal des Mikanits, möglich ist, zuverlässig arbeitende Wechselstrommaschinen zu konstruieren, die direkt hochgespannte Ströme von 10000 Volt, 20000 Volt und mehr liefern. Derartige Spannungen aber genügen für Übertragung elektrischer Energie selbst auf sehr weite

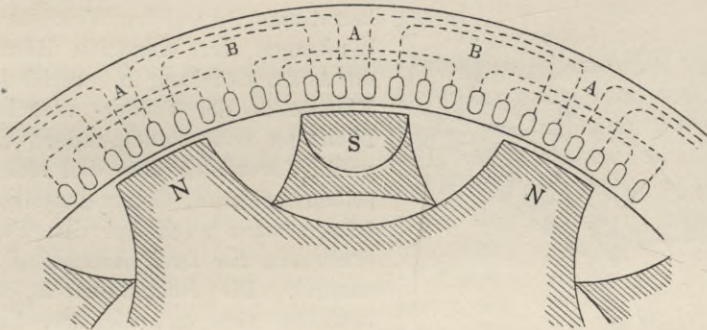


Fig. 174.

Anordnung des Ankers für eine Zweiphasenmaschine der älteren Oerlikontype.

Entfernungen bei Benutzung von Leitungen von sehr geringem Querschnitte. Alsdann kann mindestens eine Transformation des Stromes in Wegfall kommen. Neuerdings werden aber vielfach auch die zu Arbeitsübertragungen dienenden Elektromotoren für so hohe Spannungen gebaut, daß gar keine Transformation der elektrischen Energie mehr nötig ist.

Bei Wechselstrommaschinen für Zwei- und Mehrphasenströme kann man den verfügbaren Wickelraum auf dem Anker dadurch günstiger ausnutzen, daß man die einzelnen Spulen, die den verschiedenen Stromkreisen angehören, zum Teil übereinander übergreifen läßt. Die Verbindungsstücke der Stäbe bei Stabwicklung oder die nicht der Induktion unterworfenen Teile der Bewickelung werden dann in verschiedene Ebenen abgebogen, um Kurzschlüsse zu verhüten. So zeigt z. B. Fig. 174 die Anordnung der Verbindungsstücke (durch gestrichelte Linien angedeutet) auf der einen Seite des Anker Eisens bei einer Maschine für Zweiphasenstrom nach der älteren Oerlikontype.

Aus Fig. 175 erkennt man die Lage der Verbindungsstücke auf einer Seitenfläche des Ankers bei einer Maschine mit rotierenden Innenpolen für Dreiphasen- oder Drehstrom.

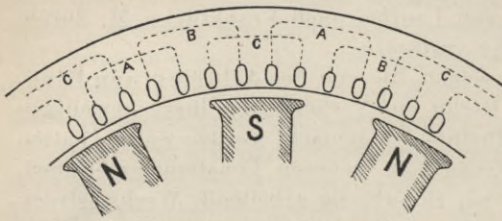


Fig. 175. Anordnung der Ankerwicklung bei einer Drehstrommaschine.

Man sieht, daß die Spulmitten in diesen Abbildungen um die Hälfte oder ein Drittel der Polbreite gegeneinander verschoben sind. (Vergl. auch Fig. 114, S. 175.)

Aus der Abbildung,

Fig. 176, die ein Stück des Ankers eines Drehstrommotors darstellt, erkennt man, in welcher Weise die Verbindungen der einzelnen Elemente der Ankerwicklung in verschiedenen Ebenen an der Vorder- oder Rückfläche des Ankers aneinander vorüber geführt werden, ohne daß sich dieselben berühren. Genau dasselbe Verfahren wird auch bei den Stromerzeugern für Dreiphasenstrom verwendet. Die Buchstaben A, B, C beziehen sich auf die drei Leitergruppen, die die drei um je 120° in der Phase gegeneinander verschobenen Ströme J_A , J_B und J_C führen. Gleichzeitig kann diese Ankerwicklung als Beispiel für den Fall dienen, daß nicht alle Löcher des Ankereisens mit Wicklung versehen sind.

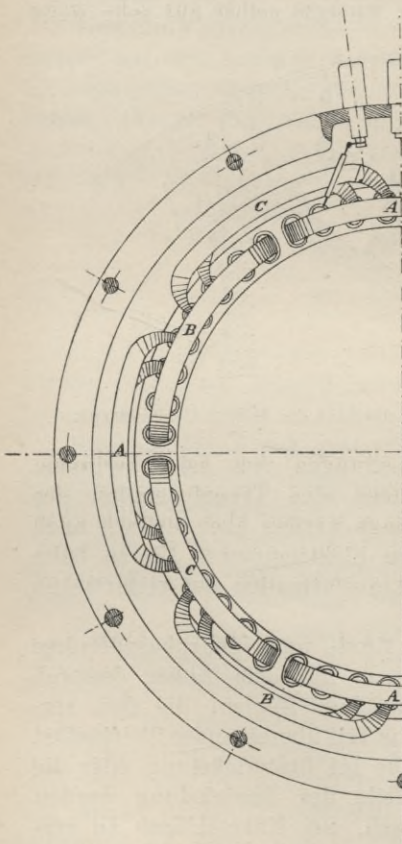


Fig. 176. Ankerwicklung einer Drehstrommaschine.

Dadurch, daß man die den verschiedenen Stromkreisen zugehörigen Spulen zum Teil übereinander wickelt und die Spulen um je eine halbe oder Drittel Polbreite gegeneinander verschiebt, kann man jede beliebige Wechselstrommaschine in eine Maschine für Zweiphasenstrom oder Drehstrom verwandeln. Um den erforderlichen Platz zu gewinnen, wenn man die Spulen nur nebeneinander legen und doch die Mitten um die Hälfte oder ein Drittel

erforderlichen Platz zu gewinnen, wenn man die Spulen nur nebeneinander legen und doch die Mitten um die Hälfte oder ein Drittel

der Polbreite gegeneinander versetzen will, läßt man dann an zwei diametral gegenüberstehenden oder an um je 120° voneinander abstehenden Stellen je eine Spule weg.¹⁾

Weniger zweckmäßig erscheint dagegen die früher von der Westinghouse Co. (Pittsburg, Amerika) für Zweiphasen-Wechselstrommaschinen gewählte Anordnung, bei der zwei Gruppen von Feldmagneten dicht nebeneinander gestellt werden, die um den halben Abstand eines Nord- und Südpoles gegeneinander versetzt sind. In diesen beiden Systemen von Feldmagneten bewegen sich in diesem Falle zwei auf derselben Welle befestigte selbständige Anker, die zwei um 90° in der Phase verschobene Wechselströme liefern.

2. Die Spannungen und Stromstärken bei verkettetem Dreiphasenstrom.

Wenn Sternschaltung angewendet wird, wie dies Fig. 171 andeutet, herrschen an den Enden der Ankerspulen 1, 2, 3 Wechselspannungen, die gleiche Maximalwerte haben, aber um 120° in der Phase gegeneinander verschoben sind. Um den wirksamen Spannungsunterschied zwischen den Anfangspunkten der Leitungen a, b, c zu finden, muß man diese Spannungen nach dem in Kap. 1, Abschn. 5, S. 8, angegebenen Verfahren zusammensetzen. Man erhält alsdann drei gleichlange Vektoren, die Winkel von 120° miteinander einschließen. (Vergl. Fig. 177.) Nehmen wir an, der Momentanwert des Spannungsunterschiedes zwischen dem bei a gelegenen Ende der Spule 1 (Fig. 171) und dem Verkettungspunkte der drei Ankerwickelungen sei $E \cdot \sin \omega t$, so ist gleichzeitig der Spannungsunterschied zwischen den Enden der Spule 2 gleich $E \cdot \sin (\omega t - 120)$ und der resultierende Spannungsunterschied $E' = \sqrt{3} \cdot E \cdot \sin (\omega t + 30)$. Die resultierende effektive Spannung oder verkettete Spannung ist somit $\sqrt{3} = 1,73$ mal größer als die Phasenspannung, deren Maximalwert E, deren effektiver Mittelwert $\frac{E}{\sqrt{2}}$ ist, und die verkettete Spannung eilt der Phasenspannung um 30° voraus.

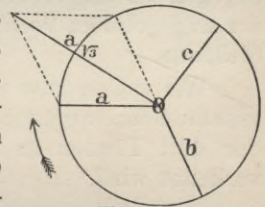


Fig. 177.
Vektordiagramm für verkettete Dreiphasenströme.

Das Vektordiagramm Fig. 177 zeigt dies deutlich. b ist rückwärts verlängert als $-b$, weil, wenn die EMK in a nach außen gerichtet ist, die in b wirksame nach innen gerichtet ist und subtrahiert werden muß.

¹⁾ Vergl. Silvanus Thompson, Polyphase Electric Currents, S. 35.
Rühlmann, Wechselstrom.

Nennen wir die Stromstärke in einer Ankerphase J , so ist sie bei Sternschaltung (Fig. 172) selbstverständlich ebenso groß in den anschließenden Außenleitern a , b , c .

Wenn dagegen, wie in Fig. 173, die drei Ankerwickelungen 1, 2, 3 in geschlossener oder Ringschaltung verkettet sind, so herrscht zwischen den Enden einer Phasenwicklung, also auch zwischen den Anfängen der Außenleiter a , b , c die Phasenspannung E . Am Vereinigungspunkte der Phasenwickelungen 1 und 2 aber kommen zwei Ströme zusammen, von denen der eine zum Vereinigungspunkte hin, der andere aber vom Vereinigungspunkte fort fließt, und bei denen eine Phasendifferenz von 120° besteht.

Diese Ströme werden daher ebenfalls nach dem Diagramm Fig. 177 zusammengesetzt, und es ergibt sich für den in den Außenleiter eintretenden Strom ein $\sqrt{3}$ mal so großer Wert als für den die Phasenwickelungen durchfließenden Strom, ebenso eilt der Leitungsstrom um 30° in der Phase voraus.

Bei der Sternschaltung ist somit der Spannungsunterschied der Außenleiter höher und die Stromstärke gleich der in den Ankerwickelungen; bei der Ringschaltung ist der Spannungsunterschied zwischen den Außenleitungen gleich der in jeder Ankerphase erzeugten, dagegen ist die verkettete Stromstärke in diesem Falle in dem vorher angegebenen Verhältnisse größer als die in den Ankerwickelungen fließende.

Wir wollen zum Schlusse nicht unerwähnt lassen, daß auch gemischte Schaltungen denkbar sind, bei denen ein Teil der Ankerspulen der drei Phasen in Ringschaltung, der andere in Sternschaltung verkettet wird.

3. Wickelungsverhältnisse einiger ausgeführten Dreiphasenmaschinen.

a) Drehstrommaschine der Maschinenfabrik Oerlikon.

Die in Fig. 162 und 163 abgebildeten Maschinen werden sowohl als gewöhnliche Wechselstrommaschinen als auch als Maschinen für Drehstrom verwendet und in verschiedenen Größen für verschiedene Spannungen und Leistungen hergestellt.

Wenn die in Fig. 163 abgebildete Maschine z. B. zur Erzeugung von Drehstrom von 3000 Volt Phasenspannung dient und einer Leistung von 300 Pferdestärken entspricht, liefert sie bei 250 Umläufen in 1 Minute 42 Perioden in 1 Sekunde.

Der ruhende Anker besitzt alsdann 30 Spulen, und zwar 10 in jeder Phase. Jede dieser Spulen besteht aus 36 Windungen eines Drahtes von 3,4 mm Durchmesser.

Das Magnetfeld wird durch eine einzige ruhende Spule erzeugt, die aus 360 Windungen eines Drahtes von 5 *mm* Dicke besteht.

b) Drehstrommaschinen von Brown, Boveri & Cie.

Wenn die auf S. 195 in Fig. 137 abgebildete Maschine der oben genannten Firma als Dreiphasenmaschine für 150 Pferdestärken ausgeführt wird, die bei 380 Umläufen 50 Wechsel in der Sekunde, 3300 Volt verkettete Spannung bei Sternschaltung und 18 Ampère Stromstärke in jeder der drei Phasen liefert, beträgt die Anzahl der wirksamen Ankerdrähte jeder Phase 608. Die Ankerwicklung wird aus Draht von 3,2 *mm* Dicke (4 *mm* besp.) hergestellt. Der Eisenquerschnitt des Ankers beträgt 380 *qcm*. Die Spulen der rotierenden Feldmagneten haben 400 Windungen und sind aus 4 *mm* dickem Drahte (besp. 4,5) hergestellt.

Der Widerstand der Bewicklung der Feldmagneten ist 3,8 Ohm.

Bei der in Fig. 169 abgebildeten achtpoligen Induktormaschine von Brown, Boveri & Cie. sind, sofern die Leistung 150 Pferdestärken beträgt, die Verhältnisse die folgenden:

Verkettete Spannung bei Sternschaltung 5300 Volt Stromstärke, in jeder Phase 11 Ampère.

Umlaufszahl 600 in 1 Minute, Zahl der Perioden 50.

Die Anzahl der Drähte ist in jeder Phase 800, der Durchmesser des Ankerdrahtes 2,5 *mm* (3,2 besp.).

Der Querschnitt des Ankereisens beträgt 860 *qcm*.

Die Erregerspule besteht aus Draht von 4,4 *mm* Dicke (4,7 besp.) und hat einen Widerstand von 2,5 Ohm.

c) Drehstrommaschine von Siemens & Halske.

Wenn die in Fig. 135 abgebildete Wechselstrommaschine unter Anwendung der auf S. 175, Fig. 114, beschriebenen Wicklung als Drehstrommaschine für 300 Kilowatt verwendet werden soll, die bei Sternschaltung eine verkettete Spannung von 2000 Volt und eine Stromstärke von 36 Ampère in jeder der drei Phasen liefert, so würden folgende Bewicklungsverhältnisse gewählt werden können:

Jede der 10 Spulen jeder Phase des Ankers enthält 20 Windungen eines Drahtes von 4,5 *mm* (besp. 5,5).

Die Spulen der 20 Feldmagneten (jeder Polschuh bedeckt 2 Nuten) haben je 270 Windungen eines Drahtes von 4,4 *mm* Dicke (5,5 besp.).

Die Erregung der Feldmagneten erfolgt durch einen Strom von 15 Ampère bei 110 Volt.

Die Umlaufszahl ist 300, die Periodenzahl 50.

Der innere Durchmesser des Ankereisens beträgt 1580 *mm*, die Breite 410 *mm*.

4. Die Drehstromgeneratoren der Kraftübertragungswerke in Rheinfelden.

Eine der gewaltigsten Kraft- und Lichtverteilungsanlagen in Europa ist von der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft in Berlin unter Benutzung der Stromschnellen des Rheins in Rheinfelden ausgeführt worden.

Der Entwurf der hierzu erforderlichen gewaltigen Drehstrommaschinen rührte ursprünglich von der Maschinenfabrik Oerlikon her; die Ausführung und die Konstruktion der später erwähnten neueren Maschinen hat jedoch die Allgemeine Elektrizitäts-gesellschaft selbst übernommen.

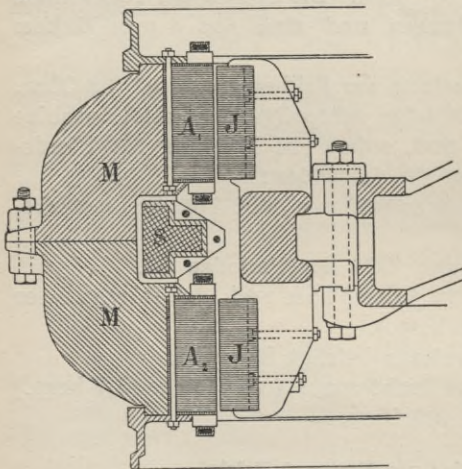


Fig. 178.

Durchschnitt durch die Drehstrommaschine der Kraftübertragung in Rheinfelden.

A_1 und A_2 , die durch das aus Stahlguß hergestellte Gehäuse MM mechanisch und magnetisch miteinander verbunden sind. (Vergl. Fig. 178.) Diese Ankerringe bestehen aus einzelnen, voneinander isolierten Eisenblechen, in die Nuten zur Aufnahme der Spulen eingestanz sind. Zwischen beiden Ankerflächen liegt die mit dem ruhenden Gehäuse fest verbundene Magnetspule S.

Auf der Maschinenwelle sitzt ein Eisenkörper, der einem doppelten Zahnrade ähnlich ist. (Vergl. Fig. 159, S. 212.) Die vorspringenden Polschuhe oder Zähne schließen die Kraftlinien. Bei der Drehung dieses Polrades wandern die Stellen größter Dichte der Kraftlinien an der Oberfläche beider Anker entlang. Die Maschinen

Wir teilen einige Einzelheiten über diese Drehstromerzeuger mit,¹⁾ weil die Konstruktion in allen Teilen sehr sorgfältig durchdacht ist und gleichzeitig ein treffliches Beispiel für die Anordnung mit vertikaler Drehachse abgibt, die wir bisher noch nicht erwähnt haben. Bei direkter Kuppelung der Dynamomaschinen mit dem Schaft einer Turbine, zumal für die Ausnutzung von Wasserkraften mit geringem Gefälle, ist diese Disposition besonders zweckmäßig.

Diese Maschinen haben zwei horizontale, ruhende Ankerringe

¹⁾ Nach der wertvollen Schrift: Die Kraftübertragungswerke in Rheinfelden. Herausgegeben von der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft, Berlin 1896.

gehören somit der Induktortype an. Wenn vor einem Spulenpaar ein Polschuhpaar steht, ist die Kraftliniendichte am größten; wenn Lücken des Zahnrades vor den Spulen stehen, gehen so gut wie keine Kraftlinien durch die Spulen hindurch. Durch diesen Wechsel der Kraftlinienzahl werden in den Windungen der Spulen Wechselströme induziert.

Die Versetzung der Spulen in bezug auf die Pole (vergl. S. 175) veranlaßt die Entstehung von Mehrphasenstrom.

Bei der Anlage in Rheinfeldern stehen die Drehstrommaschinen unmittelbar über den Wasserkästen der Turbinen.

Das gußeiserne Gehäuse, das das rotierende Induktorrad ringförmig umgibt und die beiden Ankerkränze enthält, besteht aus vier Bogenstücken, die mit zwei Füßen auf einem den Turbinenkasten überspannenden Gewölbe ruhen.

Das Maschinengehäuse ist aus Teilen hergestellt, um den Transport zu erleichtern. In magnetischer Hinsicht kann diese Teilung vielleicht zu Bedenken Anlaß geben; aber die Erfahrung hat gelehrt, daß die durch eine derartige Teilung entstehenden Fugen im Eisen keinen nachteiligen Einfluß ausüben, zumal gerade bei dieser Art Maschinen der Verlauf der magnetischen Kraftlinien hauptsächlich in radialer und axialer Richtung und nur zum geringsten Teile parallel zur Bohrung erfolgt. Die andere Fuge in der Gürtelzone, die durch die Teilung des Gehäuses in zwei einzelne Ringe bedingt ist, ist ganz ohne jeden Belang, da hier die Kraftlinienströmung in einem großen Querschnitte ganz stetig verlaufen kann.

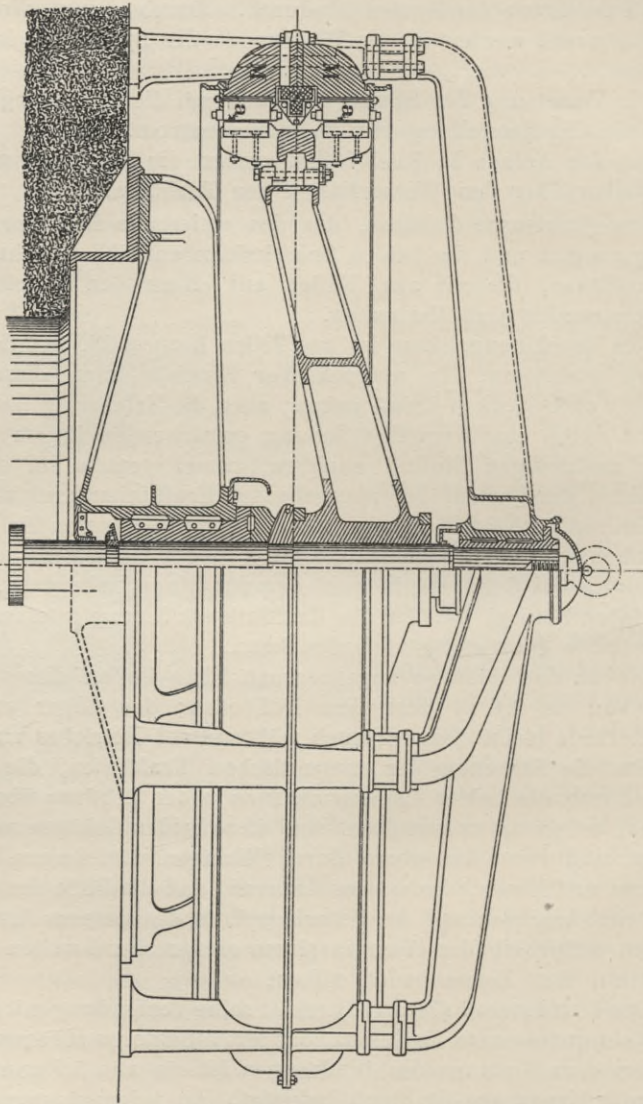
Die an das Gehäuse angegossenen Füße halten dieses in einer Höhe von ca. 0,6 *m* über dem Fußboden; das Lager unter dem Induktorrade bleibt dadurch auch während des Betriebes zugänglich.

Um die Streuung der magnetischen Kraftlinien, die von der Welle durch die beiden Lagerarmkreuze in das Gehäuse überzugehen streben, möglichst zu verhüten, sind diese beiden Gehäuse magnetisch isoliert, und zwar das obere durch Einlagen von Bronze zwischen Gehäuse und Kreuz, das untere dadurch, daß die Füße des Gehäuses nicht auch zugleich auf der Unterlagsplatte des unteren Armkreuzes, sondern außerhalb desselben in einem entsprechend weiten Umkreise direkt auf dem Zementboden stehen.

Das Induktorrad (Fig. 179) erhält seine Verbindung mit der Welle durch ein gußeisernes Armkreuz, das aus 5 Sektoren zusammengesetzt ist. An dem Umfange des Armkreuzes ist ein aus 5 Segmenten bestehender Kranz aus Stahlguß befestigt. An jedem Segment sind in gleicher Teilung am Umfange 11 Joche ausgebildet, die den Polen im Gehäuse gegenüberstehen und an ihren Enden zusammengenietete Pakete aus dünnem, weichem Eisenblech tragen.

Die Befestigung dieser Pakete an den Enden der Joche geschieht durch eine im Rücken des Paketes angebrachte schwalbenschwanzförmige, schmiedeeiserne Leiste, die mittels Schrauben an das Joch

Fig. 179. Gesamtansicht der Drehstrommaschine für Kraftübertragung in Rheinfelden.



angeschlossen wird. Die Zerteilung der Eisenmassen der Polhörner hat den Zweck Wirbelströme in denselben zu vermeiden, die sonst beim Vorübergehen der Hörner vor den Ankernuten entstehen würden.

Die beiden Ankerringe bestehen aus aufeinander gelegten, voneinander isolierten, segmentförmigen Eisenblechen, die mit versetzten Fugen im Kreise herum und stumpf aneinander stoßend aufeinander gelegt sind. Mit ihrem Rücken stoßen sie gegen die zylindrische Wand des Gehäuses und sind dort befestigt.

In den Nuten des Ankers sind die Spulenwickelungen untergebracht; für jeden der beiden Anker beträgt ihre Anzahl 165. Die Spulen, deren Isolation aus Mikanit besteht, sind so eingerichtet, daß sie in fertigem Zustande aufgeschoben werden. Sie können somit, falls sie schadhaft werden, leicht durch Reservespulen ersetzt werden. Diese Anordnung beansprucht allerdings einen etwas größeren Raum, als wenn die Spulen direkt auf den Anker gewickelt werden; aber die kleine Raumverschwendung ist ohne Bedeutung gegenüber den Vorzügen der schnellen Montage und Reparatur. Die Wickelung ist mit übergreifenden Spulen ausgeführt. (Vergl. S. 224.)

Bei den äußerst geringen Verlusten durch Stromwärme, Hysteresis und Wirbelströme in der Maschine sind besorgniserregende Temperaturerhöhungen auch bei Dauerbetrieb nicht eingetreten, besonders auch deshalb, weil die Abkühlungsflächen der Maschinen sehr groß sind. Zahlreiche Luftlöcher im Mantel gestatten, daß die im inneren Raum zwischen den beiden Ankern enthaltene Luft nach außen entweichen kann. Die durch das rotierende Induktorrad radial getriebene Luft wird gezwungen den Raum zwischen den Ankerspulen und der Magnetspule zu durchströmen und kühlt dadurch diese in wirksamer Weise ab.

Was die elektrischen Verhältnisse der Rheinfeldener Drehstrommaschine anbelangt, so beträgt die normale Leistung der Dynamos 61,5 Ampère bei 3900 Volt per Phase (Spannung zum neutralen Punkt). Dies ergibt eine Leistung von $3 \times 61,5 \times 3900 = 720$ Kilowatt. Unter Annahme einer durchschnittlichen Verschiebung der Stromphase durch die angeschlossenen Motoren usw. bis zu $\cos \varphi = 0,8$ würde die obige Leistung nur 580 Kilowatt wirklicher Energie entsprechen und somit an der Welle ungefähr 840 PS erfordern.

Der gesamte Wirkungsgrad der Dynamos beträgt, einschließlich des Energieaufwandes für die Erregung, über 92 %.

Der Ausbau des Krafthauses Rheinfeldens fiel gerade in die Zeit wesentlicher Fortschritte im Turbinenbau, durch die bei gleichem Gefälle höhere Umlaufzahlen erreicht werden konnten. Dies führte dazu, den schweren zehnteiligen Induktor der älteren Maschinen durch einen leichten einteiligen Induktor mit fünfteiligem Armstern und 55 Polen zu ersetzen. Fig. 180 läßt die Abweichungen dieser vereinfachten neueren Konstruktion erkennen.

5. Großer Drehstromerzeuger der Maschinenfabrik Oerlikon.

Durch die Größe der Abmessungen und der Leistung ist auch die in Fig. 181 abgebildete neuere Maschine der obengenannten Firma besonders bemerkenswert. Da Drehstromanlagen besonders für größere Arbeits- und Lichtanlagen in Frage kommen, stehen auf diesem Gebiete der Wechselstromtechnik gerade größere Maschinen im Vordergrund des Interesses.

Die Anordnung entspricht ziemlich genau der in Fig. 178 dar-

gestellten, jedoch ist die Hauptwelle hier horizontal gelegt, da das Induktorrad unmittelbar mit einer gewaltigen Dampfmaschine gekuppelt werden soll und für diese als Schwungrad dient. Die Leistung beträgt 1300 Pferdestärken. Das Induktorrad macht 75 Umläufe in 1 Minute; unter diesen Umständen ist die Zahl der Wechsel 40 in 1 Sekunde.

Die Schenkelspannung beträgt 240 Volt; um diese hervorzubringen trägt der ruhende Anker $2 \times 40 \times 6$ Stäbe. Die ebenfalls ruhende Feldspule besteht aus 200 Windungen eines Drahtes von 11 mm Dicke.

Die Bohrung des Ankers beträgt 5000 mm, der Durchmesser der äußeren Oberfläche

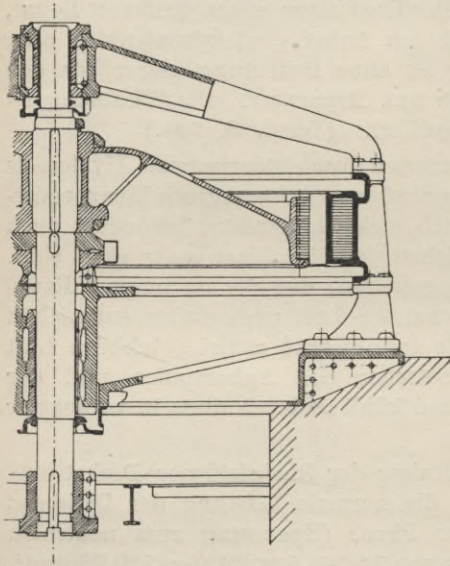


Fig. 180.

Die neuen Maschinen des Rheinfeldener Krafthauses.

des umlaufenden Induktorrades 4990 mm. Da der Luftzwischenraum zwischen dem Ankereisen und den 32 Polhörnerpaaren des Magnetrades somit nur eine Größe von 5 mm hat, war hinsichtlich der Zentrierung die allergrößte Genauigkeit und Sorgfalt erforderlich. Die Maschine ist bis nahe an die Welle in eine Grube eingebaut, sodaß nur wenig mehr als die obere Hälfte herausragt. Auf der Sohle dieser Grube ruht auf solidem Fundamente der eiserne Rahmen, der den Anker und die Erregerspule trägt. Alle weiteren Einzelheiten sind mit Rücksicht auf die nahe Verwandtschaft dieser Maschine mit den früher beschriebenen aus der maßstäblichen Zeichnung leicht verständlich.

6. Die großen Drehstrommaschinen der Berliner Elektrizitätswerke.

Die besondere Aufmerksamkeit der gesamten technischen Welt haben die neuesten großen Drehstromerzeuger der A. E.-G. erregt,

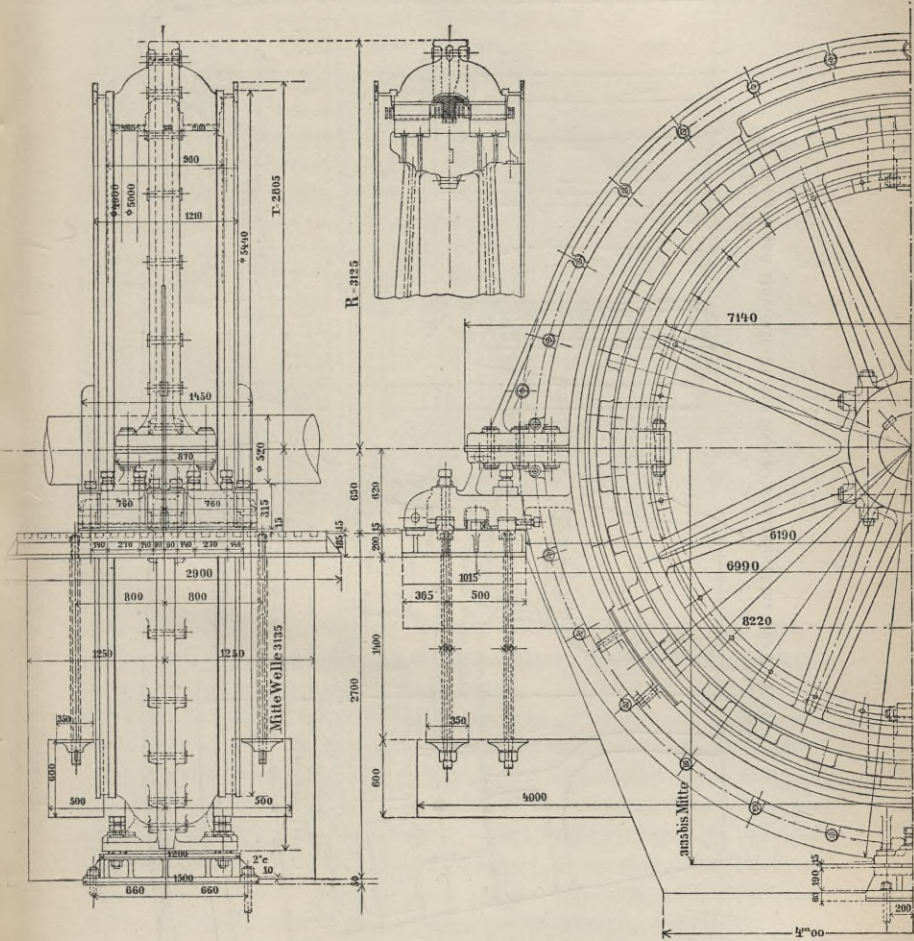


Fig. 181. Großer Drehstromerzeuger der Maschinenfabrik Oerlikon.

welche dieselben für die Krafthäuser »Oberspree« und »Moabit« der Berliner Elektrizitätswerke wiederholt ausgeführt haben.¹⁾

¹⁾ Näheres findet man in der Zeitschr. des Vereins Deutscher Ingenieure, Bd. XXXV (1901), S. 11, der auch die Figuren entnommen sind.

Jede derselben gibt bei 83 Umdrehungen in der Minute eine Leistung von 4000 Kilowatt und bedarf, wenn der Leistungsfaktor $\cos \varphi = 0,9$ ist, zu ihrem Antriebe rund 4000 Pferdestärken. Die

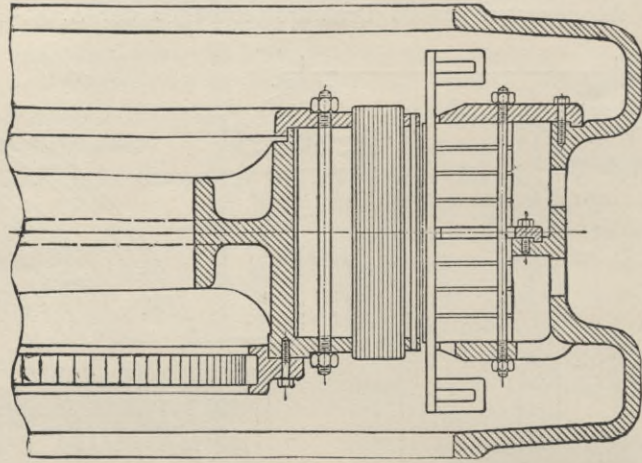


Fig. 182.
Längs- und Querschnitt der 3000 Kilowattmaschine der A. E. G.

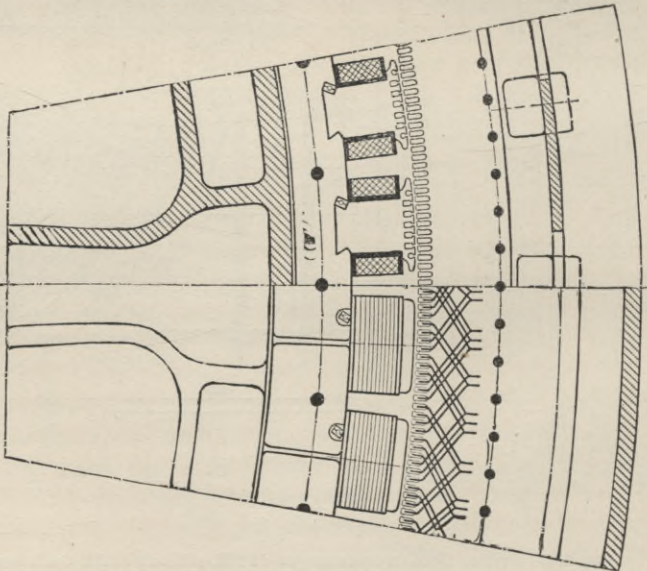


Fig. 183.
Längs- und Querschnitt der 3000 Kilowattmaschine der A. E. G.

Polzahl beträgt 72, die Anzahl der Perioden 50 in 1 Sekunde. Das Gesamtgewicht einer solchen Maschine beträgt 160000 kg, wovon auf das Gehäuse 80000, auf das Magnetrad 70000 und auf die Grundplatten u. s. f. 10000 kg entfallen.

Die Phasenspannung beträgt 3600 Volt, die verkettete Spannung somit $3600 \sqrt{3} = 6000$ Volt. Die Stromstärke in jeder Phase ist bei Vollbelastung 290 Ampère.

Die Drehstromwicklung befindet sich auf dem feststehenden Gehäuse und ist in Sternschaltung ausgeführt. Die Wicklung ist als Schleifen - Stab - Trommelwicklung ausgeführt mit Gabelverbindung (vergl. Fig. 184). Die Anzahl der Stäbe beträgt 1080; es befindet sich ein Stab von 93 *qmm* rechteckigem Querschnitt in nutloser Mikanitröhre von 3,5 *mm* Wandstärke in jeder Nute. In den Nuten werden die Stäbe durch übergeschobene Holzlineale befestigt. Die Gestalt der Eisenbleche, sowie die der Nuten und Stäbe zeigt Fig. 183. Der Widerstand einer Ankerphase beträgt (warm) 0,099 ω , der Gesamtverlust durch Stromwärme im Anker 2,5 Kilowatt. Der Strom

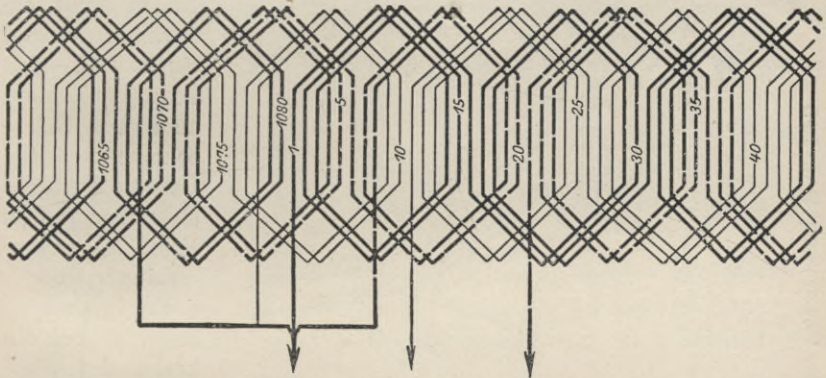


Fig. 184. Wicklungsschema der 3000 Kilowattmaschine.

wird an den tiefsten Stellen des Gehäuses durch Klemmen entnommen, die auf Porzellanisolatoren befestigt sind.

Fig. 185 und 186 zeigen Längs- und Querschnitte durch das Gehäuse und das Magnetrad. Das gußeiserne Gehäuse trägt seitlich über der Wicklung übergreifende Verstärkungswulste. Es hat drei durchgehende Wände, von welchen zwei angegossen sind, die dritte angeschraubt ist. Zwischen diesen Wänden befindet sich das Eisenblechpaket, welches durch 120 Bolzen zusammengehalten wird. Das Blechpaket besteht aus 2×4 Teilen, zwischen den Teilen befinden sich Luftspalten, der größte von 25 *mm* in der Mitte. Um im mittleren Luftspalt ein Zusammenfallen der Bleche zu verhüten, sind an die mittlere Gehäusewand Stahlvorsprünge angeschraubt, welche die Bleche stützen.

In den Luftspalten entsteht ein kräftiger, kühlend wirkender Luftstrom, der durch Öffnungen in der Gehäusewand entweichen kann.

Der größte Gehäusedurchmesser beträgt 860 *cm*, die größte

Breite 120 *cm*, die achsiale Breite der Blechpakete ist einschließlich der Luftspalte 58 *cm*. Die Bohrung ist 741 *cm*.

Auch das Eisen der 72 Feldmagnete besteht aus Blechscheiben. Mit schwalbenschwanzförmigen Enden sind sie in das Magnetrad eingesetzt; das Eisenjoch besteht auch aus Blechscheiben, jede Scheibe erstreckt sich über je drei Pole. Mit gegenseitiger Überdeckung sind sie in den Felgenkranz des Gußkörpers des Magnetrades eingesetzt; durch 72 durchgehende Bolzen werden sie festgehalten.

Der äußerste Durchmesser des Magnetrades beträgt 739 *cm*, der Luftzwischenraum zwischen den Oberflächen der Feldmagnete und des Ankers ist auf 10 *mm* bemessen.

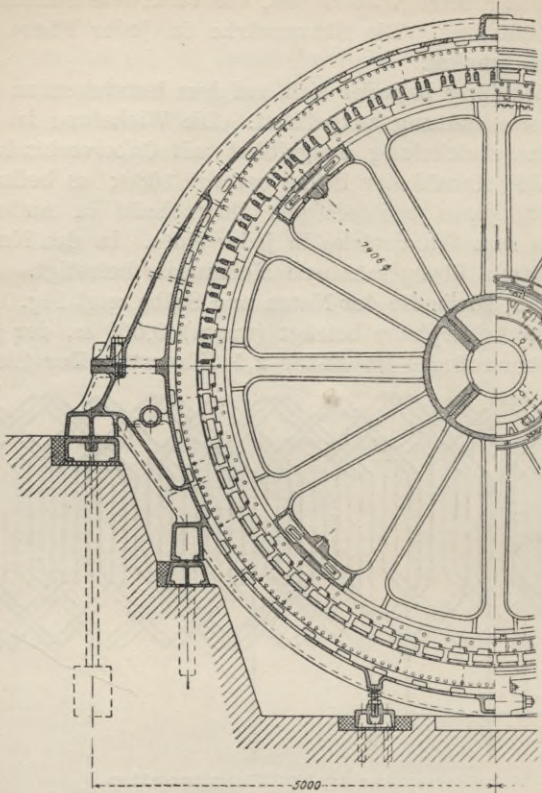


Fig. 185.
Große Drehstrommaschine der A. E.-G.

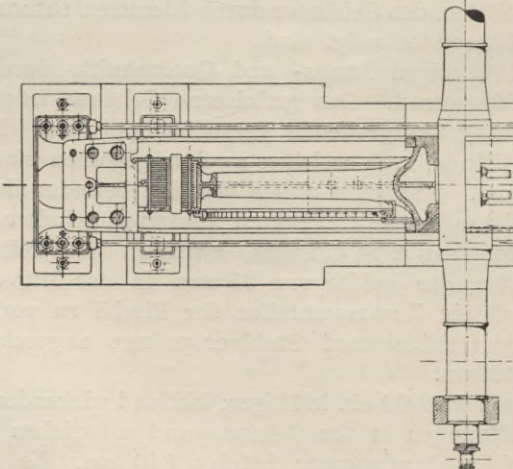


Fig. 186.

In der Richtung des Umfanges ist jede Polfläche 24 *cm* lang, die achsiale Breite beträgt 56 *cm*.

Die Bewickelung jedes Elektromagneten besteht aus 10 Lagen von je 9 Windungen. Die Wickelungen je einer Hälfte der Magneten sind hintereinander, die beiden Hälften aber parallel geschaltet. Die Erregung erfordert für einen Leistungsfaktor der Maschine $\cos \varphi = 0,9$ rund 31 Kilowatt. Der Erregerstrom wird durch zwei Schleifringe und 2×4 Bürsten zugeführt.

An den Feldmagneten sind nach einem Vorschlage von Hutin und Le Blanc behufs Dämpfung der Wirbelströme in 5 rechteckige und 2 runde Nuten (letztere nächst den Polkanten) Kupferstäbe eingelegt, die beiderseitig durch Kupfersegmente geschlossen sind. (Vergl. Fig. 183 linke Hälfte.)

Auch der Aufbau des Gehäuses und dessen Unterstützung durch vier Tragfüße ist

von technischem Interesse. Damit

das Gehäuse durch das Eigen-

gewicht nicht im horizontalen Durchmesser

durchgebogen wird, sind an den oberen Füßen zu beiden Seiten der Maschine Zugstangen angebracht, die durch Schraubmuttern zusammengezogen werden können. (Vergl. Fig. 185 und 186.)

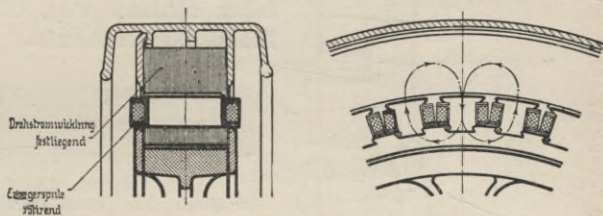


Fig. 187.

Moderne Anordnung für größere Wechselstrommaschinen.

7. Neuere Konstruktionen der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft.¹⁾

Schon die vorher gegebenen Beispiele haben gezeigt, daß es für große Maschinen neuerdings allgemein üblich geworden ist den durch Fig. 187 charakterisierten Typus zu verwenden, bei dem die Ankerwicklung feststeht, und in deren Innern ein Kranz von Elektromagneten rotiert.

Die Verwendung von Tandemaschinen, Dampfturbinen, Gasmotoren bedingt eine Vermehrung der Umfangsgeschwindigkeit. Wenn man diese Geschwindigkeit über 25 *m* steigern will, wird der Kranz durch die Zentrifugalkraft des Eigengewichtes und durch die der Pole und ihrer Erregerpulen übermäßig beansprucht.

¹⁾ Vergl. O. Lasche, Der Aufbau und die planmäßige Herstellung der Drehstrom-Dynamomaschinen. Zeitschr. des Vereins Deutscher Ingenieure 1901, Heft 28 und 29.

Dies ist Veranlassung geworden zu den durch Fig. 188 dargestellten Anordnungen überzugehen. Es wird über das Rad ein Kranz aus Schmiedeeisenblechen gelegt, in den die Polkerne mittels Schwalbenschwanzes eingefalzt werden. Die Kranzstücke zwischen den Armen des Rades sind entbehrlich, sofern sie nicht als Schwungmassen nötig sind, und aus dem Rade ist schließlich ein einfaches Speichensystem geworden. Der Blechkranz wird nur auf Zug beansprucht. Die Blechpakete werden ähnlich wie die Glieder einer Kette durch Bolzen verbunden (vergl. Fig. 189). Alle Unsicherheiten durch Gußspannungen fallen alsdann weg, die Festigkeits- und Elastizitätsverhältnisse lassen sich sicher

Fig. 188. Neue Anordnung des Induktorrades der A. E.-G.

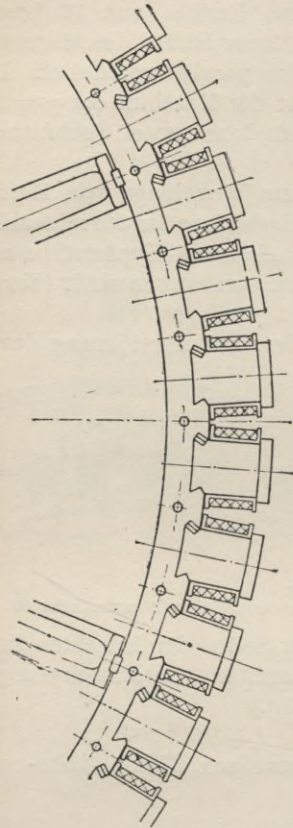


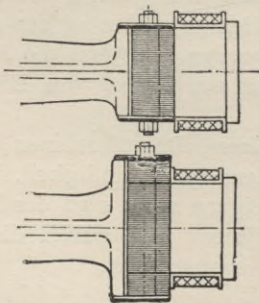
Fig. 189. Die Verbindung der Blechpakete eines Induktorrades der A. E.-G.

durch Rechnungen übersehen, weil man ein durchaus gleichartiges, vorzügliches Material vor sich hat.

Alle Verbindungen sind, weil sie durch Bolzen hergestellt sind, gelenkig.

Auch beim gußeisernen Gehäuse, welches die Ankerwickelungen trägt, läßt sich ein genügend starrer, gegen Durchbiegungen genügend sicherer Aufbau nur mit sehr großem Materialaufwande durchführen. Um die Menge des konstruktiven Materiales für den Aufbau möglichst zu verringern, ist der Oberingenieur Lasche der A. E.-G. neuerdings mit bestem Erfolg dazu übergegangen den Ankerring als Spanner auszubilden.

Es war ein für die Konstruktion moderner, großer Maschinen geradezu entscheidender Schritt, auf das gußeiserne



Gehäuse ganz zu verzichten und den durch die magnetischen Verhältnisse bedingten Kranz aus Eisenblech zum Hauptträger der ganzen Konstruktion zu machen.

Fig. 190, 191, 192 zeigen Schnitte durch solche moderne feststehende Anker großer Wechselstrommaschinen der A. E.-G.

Um Durchbiegungen zu verhüten und das Gehäuse völlig rund zu spannen, dient ein Spannwerk.

Dieses Spannwerk ist entweder ein System von Zugstangen, welche außen als Tangenten um das Gehäuse herumgelegt werden, vergl. Fig. 191; oder es werden die Punkte, welche die größte Ausbiegung erfahren würden, durch Zugstangen in der Richtung von Kreissehnen miteinander verbunden (Fig. 192).

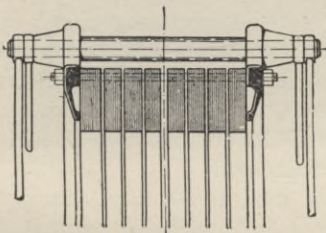


Fig. 190.

Durchschnitt eines Ankers der A. E.-G. mit Spannstangen.

An Stelle der Wangen bzw. der alten massiven Gußgehäuse treten ein Paar leichte Preßplatten, die als Unterlage für die Querbolzen dienen, und die ferner die Gelenkbolzen tragen, an welchen die Zugstangen des Spannwerkes angreifen.

Bei zwei Maschinen für 5000 Kilowatt Leistung zeigt die Gegenüberstellung der Zahlen die außerordentliche Ersparnis an Gewicht und Material.

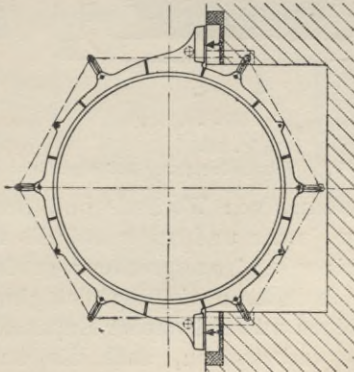
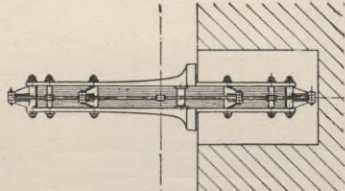
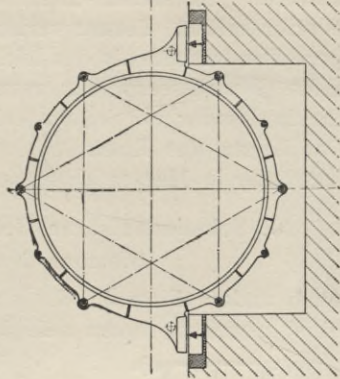
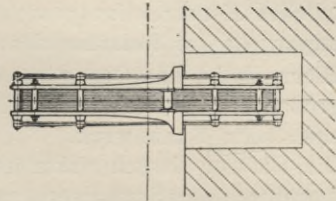


Fig. 192.
Fig. 191.
Ausbildung des Gehäuses der Wechselstrommaschinen als Spannwerk durch die Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft.

Gewicht des magnetisch beanspruchten Materials (Ring aus Eisenblech) .	Stifes, gußeisernes Gehäuse	Spannwerkgehäuse
40 t	40 t	40 t
Zusätzliches Konstruktionsgewicht . .	195 t	10 t
Gesamtgewicht des feststehenden Teiles	235 t	50 t

Hiernach ist das Gesamtgewicht im ersteren Falle rund sechsmal größer als das elektrisch erforderliche Gewicht, gegenüber dem $\frac{5}{4}$ fachen beim Spannwerk.

Die Skizzen lassen erkennen, welche Erleichterungen bei der Montage durch das Spannwerkssystem geboten werden. Das Montieren der schweren gußeisernen Gehäusestücke machte früher sehr schwere Krane erforderlich. Ferner verlangt das massige Gehäuse viel kostspieligere Fundamente als das leichte Spannwerk. Der Transport wird durch die Gewichtsersparnis wesentlich billiger, ebenso der Zoll bei Einfuhr in Länder mit hohen Zollschraken.

Der Kranz aus Eisenblech, die Polhörner und Spulen können als Einzelteile in Massenfabrikation hergestellt werden.

8. Schmiedeeiserne Gehäusekonstruktionen von Siemens & Halske, A.-G.

Auch andere Firmen, die sich mit dem Bau großer Dynamomaschinen abgeben, haben sich genötigt gesehen auf Mittel und Wege zu sinnen, um das Gewicht des nicht-aktiven Teiles der größeren Maschinen zu vermindern.

Die moderne Entwicklung der Elektrotechnik drängt, zumal bei

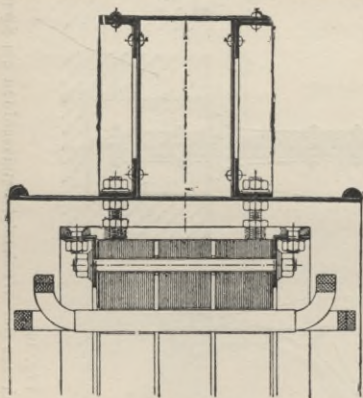


Fig. 193.

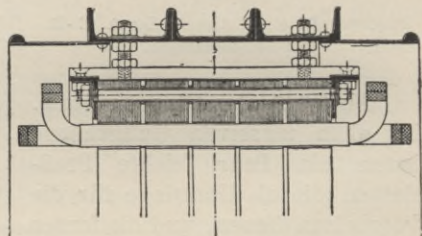


Fig. 194.

Schmiedeeiserne Ankergehäuse der Siemens-Schuckert-Werke.

Anwendung von Wechsel- und Drehstrom in größeren Elektrizitätswerken, mehr und mehr auf die Anwendung sehr großer Dynamomaschinen und entsprechend großer Dampfmaschinen. Der Betrieb läßt sich dadurch wirtschaftlich günstiger gestalten, weil große Dampfmaschinen mit mehrfacher Expansion für die gleiche Leistung weniger Dampf verbrauchen, auch die unvermeidlichen Verluste verhältnis-

mäßig geringer werden und weil die Bedienung großer Maschinen weniger Arbeitskräfte erfordert, als die Wartung einer größeren Zahl kleinerer Maschinen von gleicher Gesamtleistung.

Die Leistungen und Abmessungen der Wechselstrommaschinen wurden daher von Jahr zu Jahr vergrößert und die Gewichte wuchsen schließlich derart ins Ungeheuerliche, daß der Transport und der Zusammenbau am Bestimmungsorte große Schwierigkeiten bereitete.

Die Firma Siemens & Halske A.-G. hat, einer Anregung ihres Direktors Dihlmann folgend, zur Lösung der hierdurch sich ergebenden Aufgabe einen etwas anderen Weg betreten,¹⁾ als die Allgemeine Elektrizitätsgesellschaft.

Das Gehäuse, welches den Ankerring trägt, ist als schmiedeeiserner Kasten ausgebildet, ähnlich den Blechträgern, die im Brückenbau Verwendung finden.

Die genaue Zentrierung erfolgt alsdann durch eine eigenartige Zwischenkonstruktion, die aus den Querschnitten Fig. 193 und 194 völlig ersichtlich ist.

Der aktive Eisenring mit der darin befindlichen Wicklung ist ja in gewissem Sinne einer

nur wenig beweglichen Gallschen Gelenkkette ähnlich; er wird durch kräftige Winkelleisen und achsiale Spannbolzen fest zusammen gehalten und durch Anziehen von Schrauben in die richtige Lage gebracht.

Durch diese Konstruktion wird das Gewicht des aktiven Eisens zum Gehäusegewicht auf das Verhältnis 1 : 1 gebracht, während früher bei Anwendung gußeiserner Gehäuse dieses Verhältnis 1 : 5 betrug.

Außerdem wird die natürliche Kühlung des aktiven Eisens durch die erheblich erleichterte Luftzuführung wesentlich vergrößert, sodaß Maschinen gleicher Größe nunmehr unbedenklich stärker beansprucht werden können, als dies vorher möglich war.

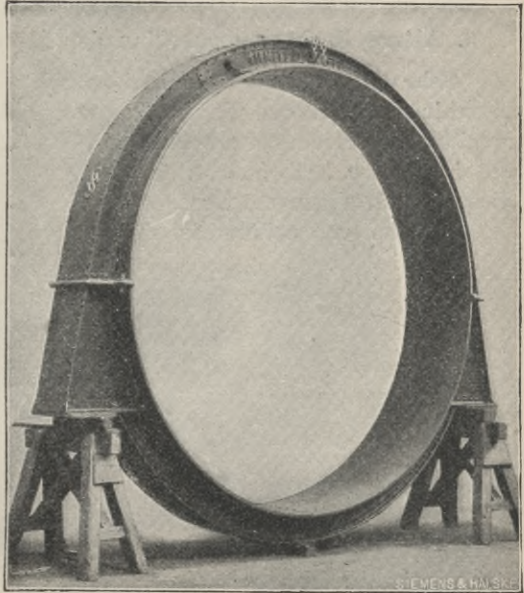


Fig. 195. Anker einer Wechselstrommaschine in schmiedeeisernem Gehäuse der Siemens-Schuckert-Werke.

¹⁾ Vergl. den Vortrag von H. Böhmländer, ETZ 1902, S. 659.

Durch Verwendung gangbarer Walzeisenprofile zur Konstruktion der Gehäusenkörper kann zumal für kleinere Maschinen von gleichem Radius leicht eine Verbreiterung der Modelle ohne entsprechende Steigerung der Kosten bewerkstelligt werden.

Fig. 195 zeigt einen solchen für eine große Drehstrommaschine bestimmten Anker in schmiedeeisernem Gehäuse kurz vor seiner Fertigstellung.

Gelegentlich werden diese einfachen schmiedeeisernen Ankergehäuse sogar erst an dem Orte, an dem die Maschine aufgestellt werden soll, angefertigt.

9. Ältere Drehstrommaschine der Maschinenfabrik Oerlikon.

Sehr lehrreich ist es, mit den soeben beschriebenen Drehstrommaschinen die älteren Formen zu vergleichen, um die großen konstruktiven Fortschritte zu erkennen, die in kurzer Zeit (seit 1890) auf diesem Gebiete gemacht worden sind.

Von dauerndem Interesse für die

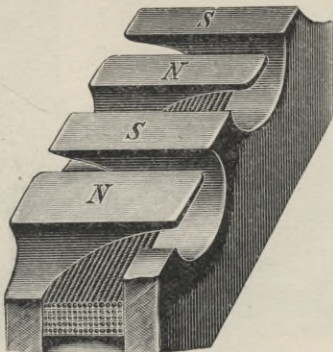


Fig. 196. Ein Stück des rotierenden Feldmagneten nebst Wickelung von einer Drehstrommaschine der älteren Oerlikontype.

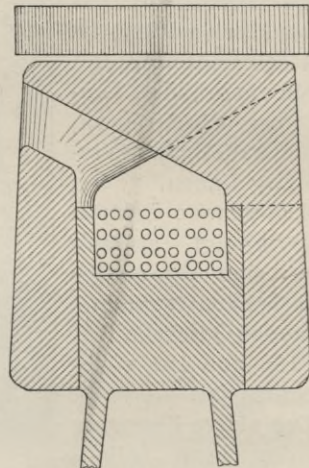


Fig. 197. Querschnitt durch den äußeren Feldmagnetring der Maschinen der älteren Oerlikontype.

Geschichte der Technik bleibt die Konstruktionsform der Drehstrommaschinen, durch die im Jahre 1891 die denkwürdige Arbeitsübertragung von Lauffen nach der elektrischen Ausstellung in Frankfurt a. M. erfolgreich bewerkstelligt wurde. Der Entwurf derselben rührte von C. E. L. Brown, dem damaligen Konstrukteur der Maschinenfabrik Oerlikon, her.

Der Anker dieser Maschine ruht und die Feldmagnete rotieren. Der Feldmagnet besteht aus drei Teilen: aus einem Gußringe mit zwei Flanschen, um den eine einzige Erregerspule gewickelt ist, und zwei an den Gußring angeschraubten Gußstahlringen mit klauenförmig

über die Wickelung übergreifenden Polhörnern. (Vergl. Fig. 196.) Wird der Erregerspule Strom zugeführt, so werden die geradzahligen Polhörner, die von der linken Seite über die Wickelung übergreifen, alle nordmagnetisch und die von der rechten Seite ausgehenden Polhörner alle süd magnetisch. Am abgedrehten Umfange folgen sich somit entgegengesetzte Pole, die durch Luftzwischenräume voneinander getrennt sind.

Der größeren Deutlichkeit wegen ist in Fig. 197 auch noch ein Achsenschnitt durch den äußeren Kranz des rotierenden Feldmagneten

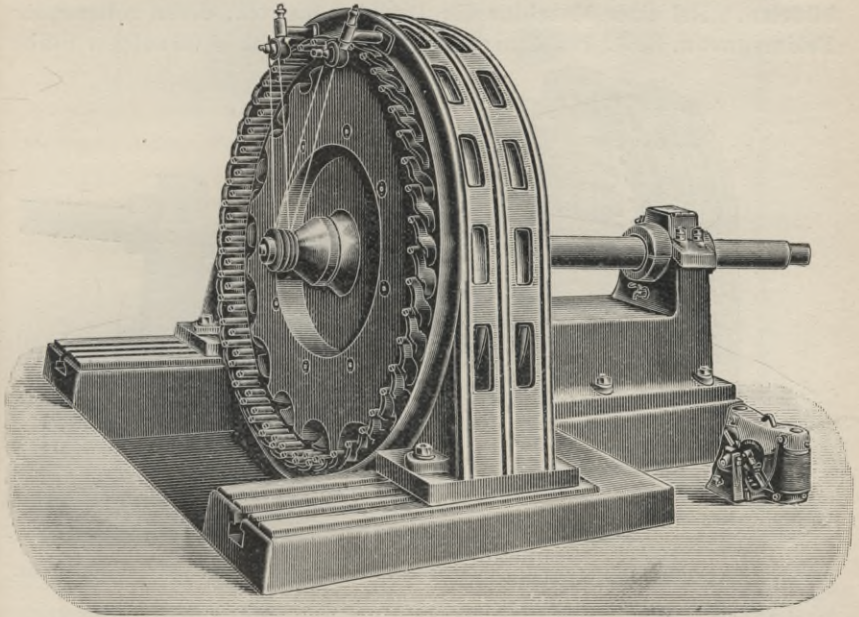


Fig. 198. Drehstrommaschine der älteren Oerlikontype mit feststehendem Anker und rotierender Erregung.

dargestellt. Über den Polhörnern ist in dieser Abbildung oben ein Stück des aus Eisenblechen hergestellten Ankerkörpers angedeutet. Bei Maschinen für hohe magnetische Sättigung müssen die Außenflächen der Polhörner aus Eisenblechen gebildet werden, um ein zu starkes Erhitzen der Polspitzen durch Wirbelströme zu vermeiden.

Die Zuführung des das Feld erregenden Gleichstromes erfolgte durch zwei auf der Nabe aufsitzende Schleifringe. Zu diesen Schleifringen gelangte bei diesen alten Maschinen der Strom durch zwei elastische, leitende Metallschnüre, die über zwei am Maschinengestell befindliche metallische Rollen laufen, die ihrerseits mit den Polen einer kleinen Gleichstrommaschine in Verbindung standen. (Vergl. Fig. 198.)

Der Feldmagnet rotierte in einem feststehenden als Anker dienenden Hohlzylinder, der aus Eisenblättern hergestellt und von einem Gußrahmen zusammengehalten wurde. Dieser Gußrahmen ruhte auf einem Fundamente und konnte durch Stellschrauben parallel der Welle verschoben werden, wenn Ausbesserungen nötig waren. (Vergl. Fig. 199.) Ganz nahe der inneren Oberfläche waren durch den aus Blättern hergestellten Eisenkern Löcher gebohrt; diese Löcher wurden mit einer guten Isolation (Asbeströhren) ausgekleidet und durch diese Röhren waren Kupferstangen geführt, welche die Ankerwicklung bildeten. Bei einer Maschine für Dreiphasenstrom, deren rotierender Feldmagnet z. B. 32 Polhörner hatte, waren $3 \times 32 = 96$ solcher Stäbe

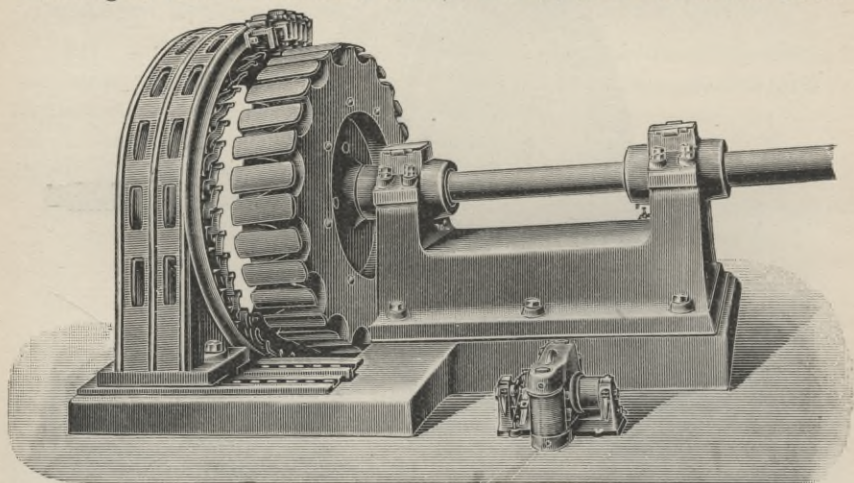


Fig. 199. Drehstrommaschine der älteren Oerlikontype, nachdem die vordere Hälfte des Ankers zurückgeschoben, die hintere entfernt worden ist.

vorhanden. Die Verbindung dieser Kupferstäbe zur Ankerwicklung erfolgte nach folgendem Schema:

1,	4,	7,	10	. . .	91,	94
95,	92,	89,	86	. . .	5,	2
93,	90,	87	3,	96

Die Maschine lieferte drei Ströme von je 1400 Ampère bei 50 Volt Spannung. Der Anker machte 150 Umdrehungen in jeder Minute.

Zwei Spulen wurden somit vom Wechselstrom in entgegengesetztem Sinne durchlaufen wie die dritte, sodaß man tatsächlich eigentlich drei um 60° in der Phase gegeneinander verschobene Ströme vor sich hatte. Die drei Anfänge 94, 2, 96 waren miteinander und einer Klemme J verbunden, wie dies stets bei der Sternschaltung der Fall ist. Die Stäbe 1, 95, 93 stehen mit den drei Polklemmen in leitender Verbindung. Die Ankerwicklung erfolgt als

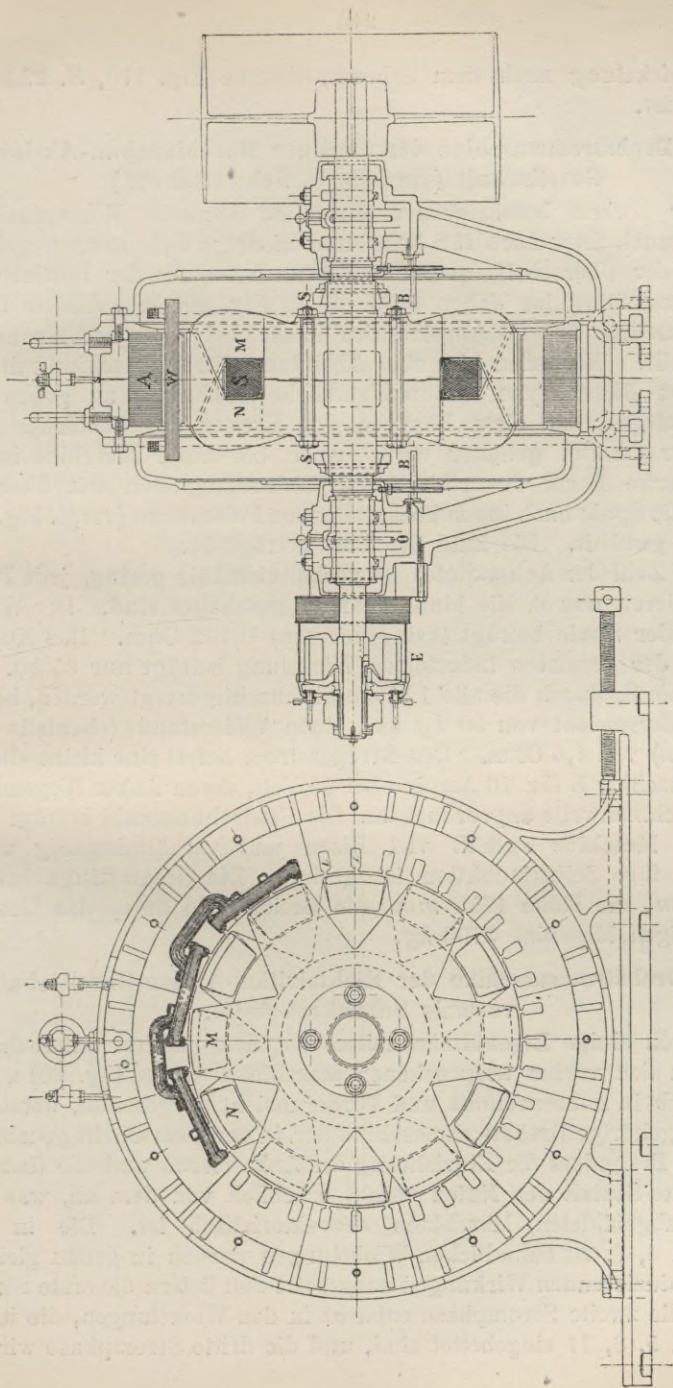


Fig. 200. Drehstrommaschine der Berliner Maschinenbau-Aktien-Gesellschaft (vormals L. Schwartzkopf).

Wellenwicklung nach dem Schema, das in Fig. 170, S. 220 dargestellt ist.

10. Drehstrommaschine der Berliner Maschinenbau-Aktiengesellschaft (vormals L. Schwartzkopf.)

Der soeben beschriebenen Maschine ähnliche Konstruktionen werden auch jetzt noch für hohe und niedrige Spannungen gebaut. Die in der Überschrift genannte Firma hatte auf der Berliner Gewerbeausstellung im Jahre 1896 die in Fig. 200 abgebildete Drehstrommaschine für 20 Ampère pro Phase bei 2000 Volt Spannung ausgestellt. Wir teilen hier eine Abbildung dieser Maschine mit, um auch von dieser Type eine maßstäbliche Zeichnung zu geben und um zu zeigen, daß diese Form in den Kreisen der Fachleute noch nicht für veraltet gehalten wird. Auch bei dieser Maschine ist die Brownsche Form des rotierenden Elektromagneten mit über die rotierende Spule nach innen übergreifenden Polschuhen (vergl. Fig. 196, S. 242) gewählt. Die Zahl der Pole beträgt 12.

Die Zahl der Ankerspulen ist verhältnismäßig gering, jede Phase besitzt deren nur 6, die hintereinander geschaltet sind. Der Widerstand jeder Spule beträgt (kalt gemessen) 0,102 Ohm. Das Kupfergewicht der gesamten induzierten Wicklung beträgt nur 65 *kg*. Die eine Spule S, durch die alle 12 Pole gleichzeitig erregt werden, besitzt ein Kupfergewicht von 90 *kg* und einen Widerstand (ebenfalls kalt gemessen) von 4,6 Ohm. Den Erregerstrom liefert eine kleine Gleichstrommaschine E für 10 Ampère bei 65 Volt, deren Anker fliegend auf der Maschinenwelle angeordnet ist. Die Umdrehungszahl beträgt 500.

Die Maschine enthält viel Eisen und verhältnismäßig wenig Kupfer, ihre Selbstinduktion ist gering. Die Gesamtlänge beträgt 1850 *mm*, die Höhe 1650 *mm*, die Breite 1825 *mm*, das Gewicht der fertigen Maschine 3700 *kg*.

11. Drehstrommaschine der Elektrizitäts-Aktiengesellschaft vormals Schuckert & Co.

Durch einige Eigentümlichkeiten der Konstruktion unterscheidet sich von den vorher besprochenen Maschinen die in Fig. 201 a und Fig. 201 b in Achsenschnitt und Vorderansicht dargestellte, derselben Type angehörige Drehstrommaschine der in der Überschrift genannten Firma. Besonders die Einrichtung des Ankereisens und die dadurch veranlaßte Gestalt der Nuten weicht erheblich von dem ab, was den früher abgebildeten Maschinen charakteristisch ist. Die in den Nuten 1, 4, 7, 10 befindlichen Wicklungen werden in genau gleicher Weise induzierenden Wirkungen ausgesetzt und liefern die erste Stromphase; die zweite Stromphase entsteht in den Wicklungen, die in die Nuten 2, 5, 8, 11 eingebettet sind, und die dritte Stromphase wird in

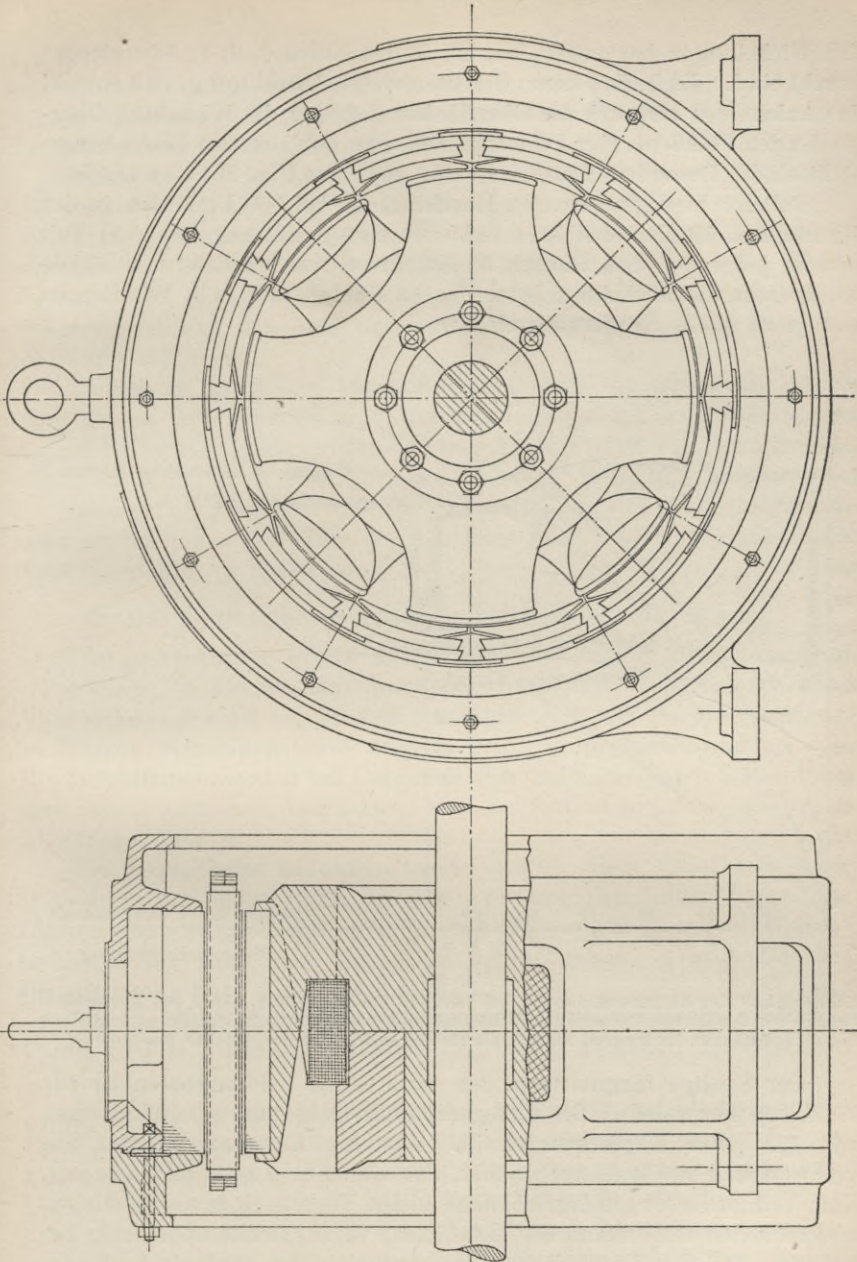


Fig. 201 a.
Drehstrommaschine der Elektrizitäts-Aktiengesellschaft vormals Schuckert & Co.

Fig. 201 b.

den Wickelungen hervorgerufen, die in den Nuten 3, 6, 9, 12 untergebracht sind. Es bedarf kaum der besonderen Erwähnung, daß sowohl das Ankereisen als auch die Oberflächen der über die Wickelung übergreifenden Polhörner der Feldmagneten aus geblättertem Eisen hergestellt sind. Besonders deutlich ist dies auch aus Fig. 201 a zu ersehen.

Bei der hier gezeichneten Maschine, die bei 750 Umläufen in der Minute und 50 Perioden in 1 Sekunde eine Spannung von 300 Volt und in jeder der drei Phasen 58 Ampère Strom zu liefern imstande ist, besteht die Wickelung jeder der 12 Spulen aus $11\frac{1}{2}$ Windungen von je 23 *qmm* Kupferquerschnitt.

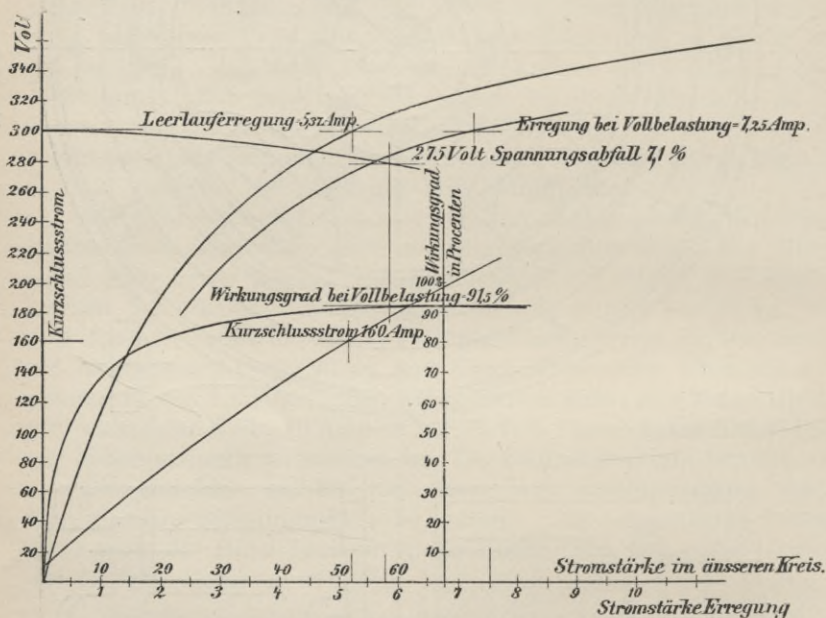


Fig. 202.

Abhängigkeit der Klemmenspannung bei Leerlauf und Belastung, sowie des Kurzschlußstromes von der Erregerstromstärke. Wirkungsgrad und Spannungsabfall für verschiedene Stromstärken im inneren Stromkreis für die in Fig. 201 dargestellte Maschine.

Der Spolige Magnetstern des rotierenden Feldmagneten ist aus Flußeisen hergestellt. Die Erregerspule besteht aus 903 Windungen von 5,3 *qmm* Kupferquerschnitt. Für die Erregung werden bei Vollbelastung 250 Watt verbraucht, das sind nur 0,84% der Leistung. Zum Teil ist dieser außergewöhnlich kleine Verbrauch in dem geringen magnetischen Widerstand des Materiales, vorzugsweise aber darin begründet, daß der Luftzwischenraum zwischen den auf einem Kreise von 592 *mm* Durchmesser gelegenen Polflächen der Feldmagneten und der Innenfläche des Ankereisens sehr gering ist, nämlich nur

4 mm beträgt. Die Charakteristik der Maschine, d. i. die Kurve, durch die der Zusammenhang zwischen Erregerstromstärke und Klemmenspannung dargestellt wird, ist sowohl für den Leerlauf als für induktionsfreie Belastung in Fig. 202 enthalten.

Außerdem ist in dieser Figur noch die Linie abgebildet, aus der man bei verschieden starker Erregung des Feldes die Stärke des Kurzschlußstromes ersehen kann. Aus der Richtung dieser Kurzschlußkurve, die nahezu eine Gerade ist, kann man, wie früher Kap. 11, 14., S. 165 gezeigt worden ist, auf die Rückwirkung des Ankerstromes auf das Feld und auf die Selbstinduktion der Ankerwicklung schließen.

Endlich ist in diesem Diagramm auch noch die Größe des Wirkungsgrades in Prozenten und der Spannungsabfall bei einer konstanten Erregung, beide Größen in ihrer Abhängigkeit von der Stromstärke im äußeren Stromkreise, also von der Belastung dargestellt.

Eine derartige graphische Zusammenstellung der Versuchsergebnisse gestattet das Verhalten der Maschine nach den verschiedensten Richtungen hin zu beurteilen.

12. Die Materialbeanspruchung bei neueren Maschinen.

Das Ankerkupfer großer Maschinen wird mit 2 bis 3 Ampère pro 1 qmm, in kleinen Maschinen bis 5 Ampère belastet. Die Erregerwicklung wird bei großen Maschinen mit 0,8 bis 1,5 Ampère, bei kleinen Maschinen bis 3 Ampère pro 1 qmm beansprucht.

Schleifringe werden bei Gebrauch von Metallbürsten mit 100 Ampère pro 1 qcm, bei Anwendung von Kohlebürsten jedoch nur mit 20 Ampère belastet.

Die magnetische Induktion im Ankereisen liegt meist zwischen $\mathfrak{B} = 4000$ und $\mathfrak{B} = 7000$; in den zwischen den Nuten liegenden Zähnen geht man bei tiefen Nuten mit \mathfrak{B}_{\max} nicht über 10000, bei runden Nuten kann man bis 18000 herauf gehen. (Vergl. Gleichstromtechnik, Kap. XXIII, 4., S. 456.)

Der Luftspalt δ beträgt für Maschinen mittlerer Größe zwischen 4 und 10 mm. Die Luftinduktion liegt meist zwischen den Grenzen 5000 und 11000.

In schmiedeeisernen Feldmagneten wählt man bei Wechselstrom- und Mehrphasenmaschinen die magnetische Induktion in den Jochen zwischen 10000 und 14000, in den Polen zwischen 14000 und 17000. Für Gußeisen kommt nur die Hälfte dieser Zahlen in Betracht. Weicher Stahlguß kann ebenso stark wie Schmiedeeisen beansprucht werden.

Gute Maschinen sollen sich bei Dauerbetrieb nicht höher als 45° über die Lufttemperatur erwärmen, und zwar soll die Erwärmung aus der Widerstandszunahme der Wicklung ermittelt werden.

14. Kapitel.

Zweiphasenmaschinen.

1. Allgemeines über Stromerzeuger für Zweiphasenstrom.

Wir haben schon früher wiederholt darauf hingewiesen, daß nur die Ankerwicklung, bei manchen Maschinen sogar nur die Schaltung der Ankerspulen geändert zu werden braucht, um aus einer einfachen Wechselstrommaschine eine Zweiphasenmaschine oder eine Drehstrommaschine zu machen. (Man vergl. auf S. 174 Fig. 113 und auf S. 211 Fig. 157.)

Bei der Zweiphasenmaschine werden zumeist in zwei Ankerwickelungen zwei Wechselströme erzeugt, die einen Phasenunterschied von einer Viertelperiode oder von 90° besitzen.

Es sind große Energieübertragungen und Verteilungen nach dem Zweiphasensystem durchgeführt worden; selbstverständlich hat man sich dabei aber sowohl für die Stromerzeuger als für die Motoren vielpoliger Anordnungen bedient, um die auch für Lichtbetrieb erforderliche höhere Wechselzahl bei mäßigen Umlaufzahlen der Stromerzeuger zu erreichen. In Deutschland hatte patentrechtlicher Schwierigkeiten wegen das Zweiphasensystem längere Zeit hindurch nur verhältnismäßig selten Anwendung gefunden.

Die Westinghouse Co. in Pittsburg in Amerika erzeugte früher Zweiphasenströme durch zwei fest miteinander verbundene Wechselstrommaschinen mit der früher (Kap. 12, Abschn. B, 4, S. 192) von uns beschriebenen Einrichtung, deren Feldmagneten und Anker um je den halben Abstand zweier aufeinander folgenden Pole versetzt sind. Eine 1000pferdige Maschine derart war beispielsweise s. Z. auf der Ausstellung in Chicago in Tätigkeit.

Bei einer solchen Verbindung zweier kongruent konstruierter und nur um eine Viertelperiode gegeneinander versetzten Maschinen findet keinerlei Ersparnis an Material oder an erregender Energie statt; neuerdings wird diese Anordnung nicht mehr gebaut.

2. Zweiphasenmaschinen von Brown, Boveri & Cie.

Der Anker dieser Maschinen bildet einen feststehenden Ring; innerhalb desselben rotieren die Feldmagneten. Die Ankerwicklung

ist in Hohlräume eines eisernen Hohlzylinders eingebettet und die Wicklung ist so angeordnet, daß die den beiden verschiedenen Phasen angehörenden Spulen übereinander greifen und mit ihren Mitten um die halbe Entfernung zweier aufeinander folgenden entgegengesetzten Polmitten voneinander abstehen. Fig. 203 zeigt, wie die Spulen in

solch einem ruhenden Anker untergebracht sind. Die Feldmagneten, die im Inneren dieses Hohlzylinders umlaufen, sind meist gerade so eingerichtet, wie bei den früher (S. 247, Fig. 196) dargestellten rotierenden Elektromagneten der älteren Wechselstrommaschinen der Maschinenfabrik Oerlikon.

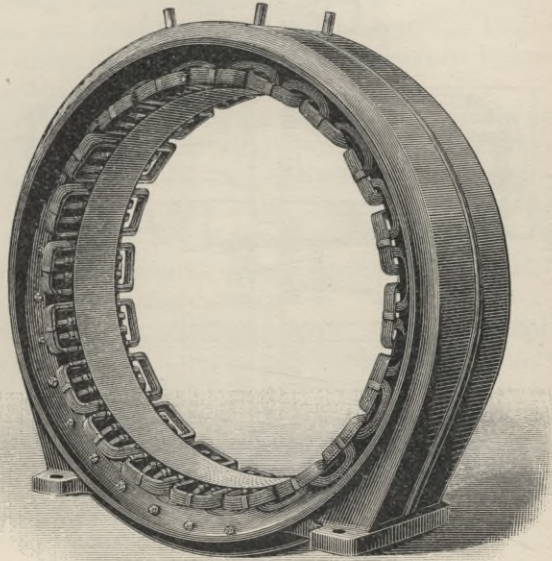


Fig. 203. Anker einer Zweiphasenmaschine von Brown, Boveri & Cie.

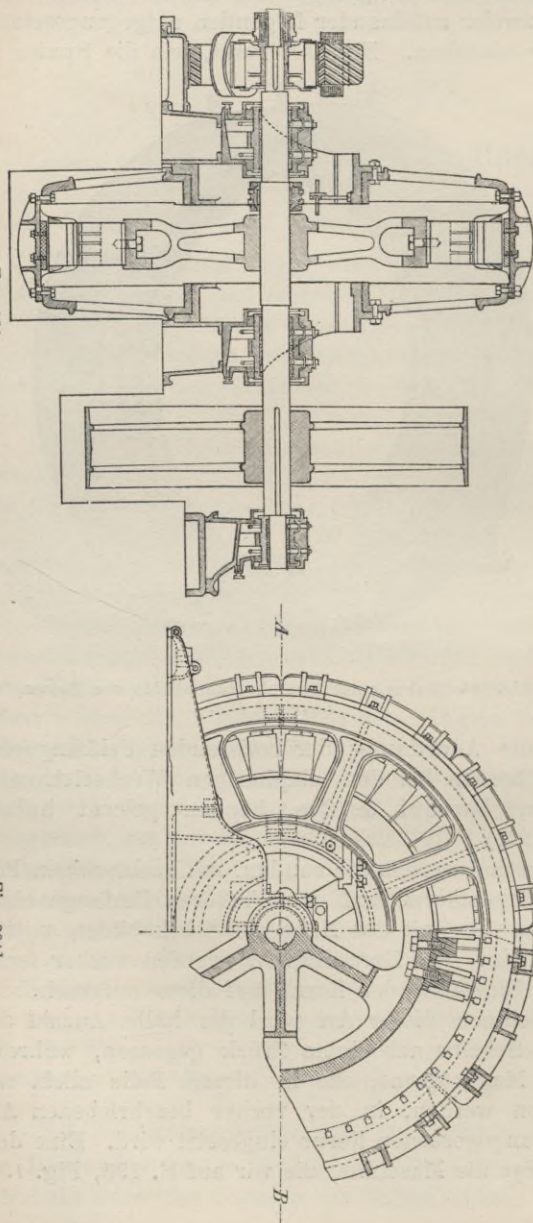
Bei einigen Maschinen dieser Art wird aber auch die Anordnung der rotierenden Feldmagneten angewendet, die wir bereits bei den einphasigen Wechselstromerzeugern von Brown, Boveri & Cie. kennen gelernt haben. (Vergl. Fig. 137, S. 195.)

Bei dieser Konstruktion werden die runden, mit rechteckigen Polschuhen versehenen Magnetkerne auf dem äußeren Umfange einer breiten, dicken Scheibe, die mit der Nabe ein Stück bildet, mittels starker Zapfen verbunden. Die Erregerspulen werden vorher fertig gestellt und vor dem Einsetzen der Kerne auf diese aufgeschoben.

Bei anderen Maschinen dieser Art wird die halbe Anzahl der Magnetkerne mit der Scheibe aus einem Stück gegossen, während die andere Hälfte der Magnetkerne, die in diesem Falle allein mit Erregerspulen versehen werden, in der vorher beschriebenen Anordnung zwischen die angegossenen Kerne eingesetzt wird. Eine derartige Konstruktion zeigt die Maschine, die wir auf S. 195, Fig. 137, abgebildet haben.

Äußerlich sind die Zweiphasenmaschinen von den gewöhnlichen Wechselstrommaschinen nicht verschieden; es ist daher nicht nötig, hier nochmals besondere Abbildungen derselben zu geben.

Fig. 204 a.
Zweiphasenmaschine der Aktiengesellschaft Dresdener Elektrizitätswerk (vormals Kummer & Co.).
Fig. 204 b.



3. Zweiphasenmaschine der ehemaligen Aktien-Gesellschaft Dresdener Elektrizitätswerke (vormals O. L. Kummer & Co.).

Um an einem Beispiele die konstruktive Durchführung einer Zweiphasenmaschine mittlerer Größe zu zeigen, teilen wir im nachstehenden die maßstäblichen Abbildungen

eines derartigen Stromerzeugers mit, die von dem früheren Oberingenieur der vorgenannten Firma, Herrn E. G. Fischinger, herrühren. (Vergleiche Fig. 204 a und 204 b.)

Bei 185 Umläufen in der Minute gibt diese Maschine 50 volle Perioden in 1 Sekunde.

Der Anker des Stromerzeugers

ruht und besteht aus 32 übergreifend gewickelten Spulen, je 16 Spulen gehören zu einer Phase. Jede Ankerspule der für 1400 Volt Phasenspannung (verkettete Spannung 2000 Volt) und 38 Ampère Stromstärke in jeder Phase bestimmten Maschine besteht aus 20 Windungen eines runden Drahtes von 5 mm Dicke. Die Wickelung liegt in Nuten mit stark übergreifenden Zähnen. (Vergl. Fig. 204 b.)

Das Ankereisen ist aus einzelnen voneinander isolierten Blechen zusammengesetzt, die durch einen mehrteiligen, gußeisernen Rahmen zusammengehalten werden.

Die 32 Feldmagneten mit abwechselnd entgegengesetzten Polen sind auf einem gußeisernen Rade befestigt, das durch sechs von einer Nabe ausgehende Arme mit der Maschinenwelle verbunden ist. Die Kerne der Magneten sind an dem Ende, das dem Anker zugewendet ist, zu etwas über die Spulen übergreifenden Polschuhen ausgebildet. Die Vorsprünge, die dadurch entstehen, dienen gleichzeitig dazu, die Spulen in ihrer Lage festzuhalten.

Die aus weichem Eisen hergestellten Kerne sind mit radialen Schlitzern versehen, um der Entstehung von Wirbelströmen entgegen zu wirken.

Jede der 32 Erregerspulen besteht aus 240 Windungen eines Drahtes von 4,5 mm Durchmesser. Der Strom, der in diesen Windungen fließt, beträgt 20 Ampère. Die Spulen sind zu je 16 hintereinander und diese beiden Stromkreise parallel geschaltet.

Der zur Erregung erforderliche Gleichstrom wird von einer direkt gekuppelten Dynamomaschine für 65 Volt geliefert, deren Anker fliegend auf der Maschinenwelle angeordnet ist.

Der Luftzwischenraum zwischen dem Eisen der Feldmagneten und dem Ankereisen beträgt 5 mm.

Die Breite der Maschine in der Richtung AB beträgt 2680 mm.

4. Die Zweiphasenmaschine der Arbeitsübertragungsanlage am Niagara.

Auch die gewaltigen elektrischen Maschinen der Kraftanlage an den Niagarafällen, deren jede die Energie einer der 12 Turbinen von je 5200 PS aufnehmen soll, sind von der Westinghouse Co. gebaute Zweiphasen-Wechselstrommaschinen mit vertikaler Achse. Diese Maschinen sind 12polige Außenpolmaschinen, deren Anker feststehen. Der äußere Magnetkranz macht 250 Umdrehungen in der Minute. Die Zahl der Perioden beträgt demnach 25 in einer Sekunde. Diese Wechselzahl ist so gering, daß nur Glühlampen mit dicken Kohlenfäden, wie solche zur Hintereinanderschaltung benutzt werden, leidlich ruhig brennen; an die Benutzung von Bogenlampen kann gar nicht gedacht werden, da diese ein merklich flimmerndes Licht geben

würden. Es ist so niedrige Wechselzahl gewählt worden, um die Hysteresis- und Wirbelstromverluste möglichst klein zu machen und um günstige Betriebsverhältnisse für Elektromotoren zu erhalten.

Die Konstruktionseinzelheiten dieser interessanten Maschinen werden durch Fig. 205a und 205b veranschaulicht. Es bezeichnet A den feststehenden Ankerkörper, der auf dem Ringträger S ruht;

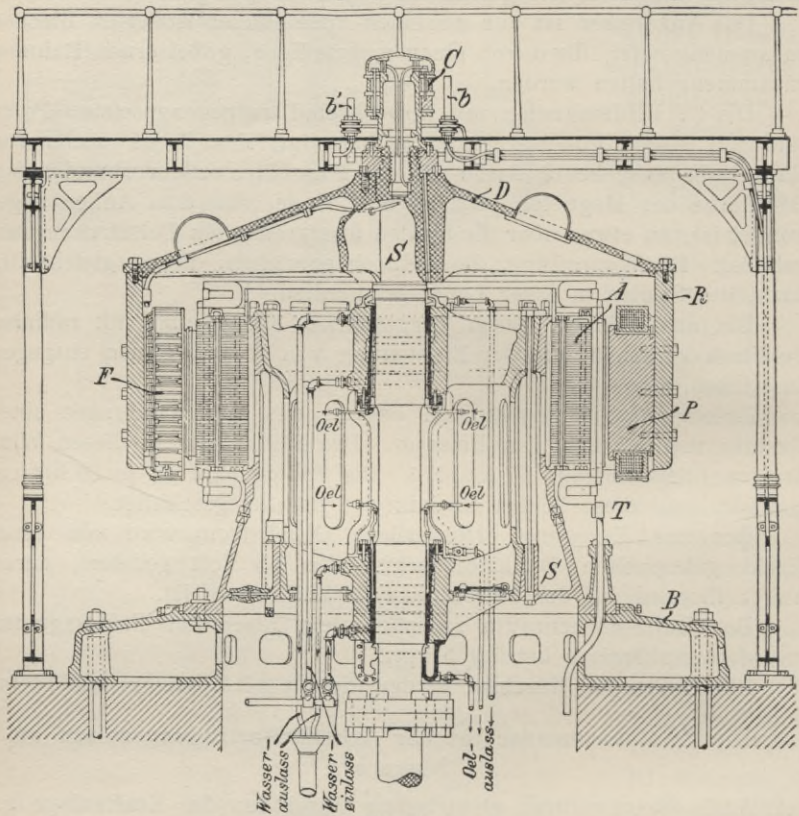


Fig. 205 a.

letzterer ist mit der Fundamentplatte B verschraubt. Da der Ankerkörper unbeweglich ist, so sind keinerlei Schleifringe und Bürsten zur Stromentnahme nötig; vielmehr sind an vier Stellen der festen Ankerwicklung Anschlüsse T vorhanden, welche den hochgespannten Strom durch eine Gußbüchse und durch die Fundamentplatte hindurch unterirdisch nach dem Schaltbrett leiten. Der rotierende Teil der Maschine besteht aus der Welle S, auf welcher der die Bewegung übermittelnde sogenannte Treiber D aufgekeilt ist; mit ihm ist der Magnetring R verschraubt, der seinerseits die 12 Polschuhe P mit

ihren Magnetspulen F trägt. Das obere Achsenende trägt zwei Schleifringe C, denen der Gleichstrom zur Erregung der Feldmagneten durch Schleifbürsten b, b' zugeführt wird. Um diese Schleifringe zugänglich zu machen, ist eine Plattform — Bürstenbrücke — aus leichter Eisenkonstruktion aufgerichtet, zu welcher eine leichte Leiter hinaufführt.

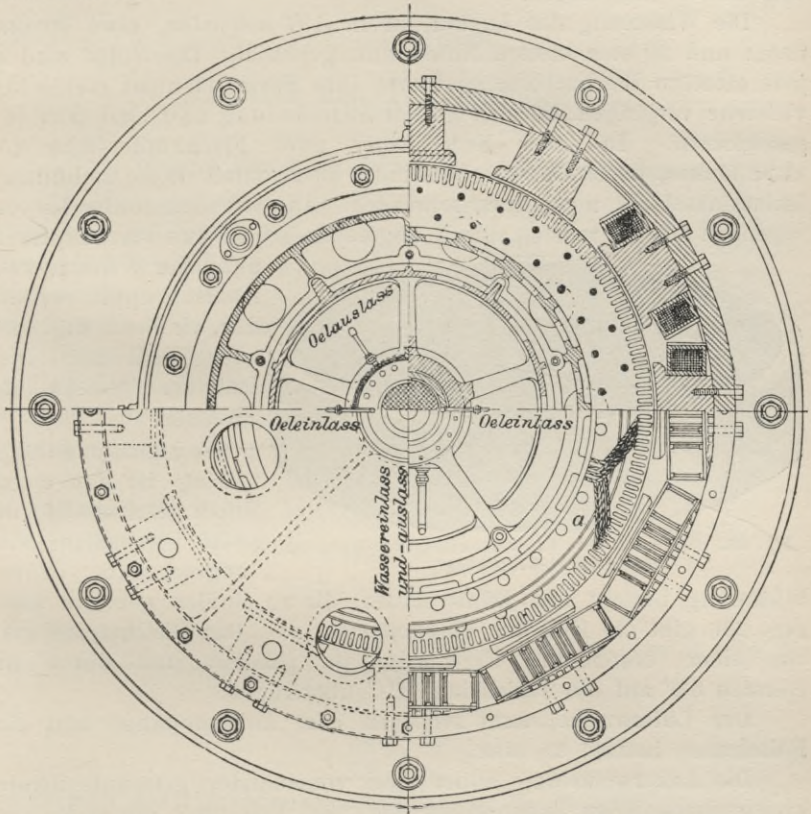


Fig. 205b. Zweiphasenmaschine der Kraftanlage an den Niagarafällen.

Der Anker ist aus einzelnen Blechscheiben von etwa $\frac{1}{8}$ mm Dicke zusammengesetzt; jede Blechscheibe für sich besteht wieder aus elf Segmenten, die einander überlappen. Um einen guten Luftumlauf auch innerhalb der Ankerscheiben zu gewährleisten, sind diese nicht sämtlich fest aufeinander gezogen, sondern es sind sechs Spalte von etwa je 25 mm gelassen. Um Foucaultströme zwischen den Eisenblechen zu vermeiden, hat man die Scheiben künstlich durch Anlassen oxydiert.

Dieser so aus Eisenblechen aufgebaute Ring wird durch im ganzen 66 Bolzen aus Nickelstahl zusammengehalten. Der Nickelstahl enthält einen sehr erheblichen Prozentsatz Nickel, welches bekanntlich geringwertige magnetische Eigenschaften besitzt, sodaß die Bolzen tatsächlich fast unmagnetisch sind. Die Bolzen sind außerdem isoliert eingezogen.

Die Wickelung des Ankers ist in 187 achsialen, etwa 90 mm tiefen und 20 mm breiten Nuten untergebracht. Die Nuten sind in jede einzelne Blechscheibe gestanzt; ihre Form ist nicht rechteckig, vielmehr verjüngen sie sich an der Ausmündung und sind dort fast geschlossen. In jeder Nute liegen zwei Flachkupferstäbe von 11×34 mm, deren Kanten abgerundet sind, damit sie die umhüllende Isolationsschicht nicht durchschneiden. Die aus den Nuten hervorragenden Enden werden durch angesetzte Stücke aus Flachkupfer in ähnlicher Weise zu zwei Spulengruppen verbunden, wie dies in Fig. 205b dargestellt ist. Die Isolation besteht aus Glimmer.

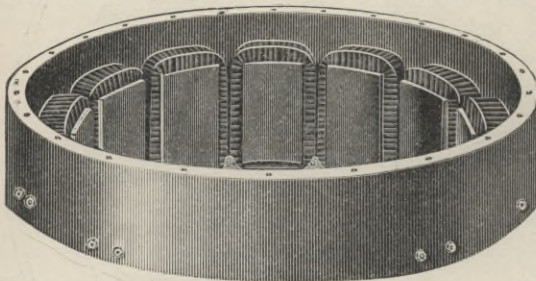


Fig. 206. Der rotierende Feldmagnetring der Maschine der Niagara-Kraftanlage.

Der umlaufende Magnetring ist aus einem Stück geschmiedet; die zwölf Polansätze sind angeschraubt. Ihre

Wickelung besteht aus Kupferstäben, die zu Spulen gebogen sind. Fig. 206 gibt ein Bild des Magnetringes. — Der Gleichstrom wird von einer besonderen Erregerdynamo geliefert und durch die Bürsten *bb'* auf die Schleifringe *CC* übertragen.

Der Luftzwischenraum zwischen dem Ankerumfang und den Polschuhen beträgt 25 mm.

Die Ankerwicklung bildet zwei voneinander getrennte Stromkreise, deren jeder Spannungen von 2400 Volt gibt, die gegen einander um 90° in der Phase verschoben sind.¹⁾

Da die Lager schwer zugänglich sind, ist der Schmierung besondere Sorgfalt zugewendet; außerdem werden die Lager durch einen Wasserstrom, der in Kanälen um dieselben herumfließt, noch besonders gekühlt.

¹⁾ Weitere Einzelheiten findet man in der Zeitschrift des Vereins Deutsch. Ing., Bd. XL, 1896, S. 439, der auch die Abbildungen entnommen sind.

15. Kapitel.

Theorie des Transformators.

1. Begriff des Transformators und Benennungen.

Die Transformatoren sind Energieumwandler; sie bestehen aus zwei elektrischen Stromkreisen, die durch einen Kreislauf magnetischer Kraftlinien miteinander verkettet sind. Bei den Transformatoren im engeren Sinne haben die beiden Wicklungen eine feste relative Lage; die Energieumwandlung erfolgt lediglich durch Induktionsvorgänge.

Die Wechselstromtransformatoren sind Vorrichtungen, dazu bestimmt elektrische Energie A eines Wechselstromes, die durch das Produkt aus Spannung e , Stromstärke i und dem Cosinus des Phasenunterschiedes φ gegeben ist:

$$A = i_p \cdot e_p \cdot \cos \varphi \dots \dots \dots 1)$$

in der Weise in andere Faktoren zu zerlegen, daß wiederum, von unvermeidlichen Verlusten abgesehen,

$$i_s \cdot e_s \cdot \cos \varphi' = A \dots \dots \dots 2)$$

wird.

Für den einfachen Fall, daß $\varphi = \varphi' = 0$ ist, ergibt dies die nur näherungsweise gültige Gleichung:

$$i_p \cdot e_p = i_s \cdot e_s,$$

Das Verhältnis

$$\frac{i_s}{i_p} = \frac{e_p}{e_s} \dots \dots \dots 3)$$

nennt man das Umsetzungsverhältnis des Transformators.

Der Transformator beruht auf den Induktionsgesetzen, und die älteste, längst bekannte Einrichtung derart war der Rühmkorffsche Induktionsapparat.

Während bei den elektrischen Maschinen die Induktion dadurch erzielt wird, daß die Leiter und ein Kraftlinienfeld sich gegeneinander relativ bewegen, so erfolgt bei den Wechselstromtransformatoren die Induktion dadurch, daß man durch eine von einem Wechselstrom durchflossene Spule ein periodisch sich änderndes Kraftlinienfeld erzeugt, und die Änderungen dieses Kraftlinienfeldes in einer zweiten Spule Wechselströme hervorrufen.

Wenn innerhalb der Windungen einer Spule die Anzahl der eingeschlossenen Kraftlinien sich ändert, so entsteht in den Windungen dieser Spule eine EMK.

Wickelt man nun auf einen Eisenkern zwei Spulen und schließt die eine an eine Wechselstromquelle an, so erzeugt der in den Windungen dieser Spule entstehende Wechselstrom ein wechselndes Kraftlinienfeld. Abgesehen von unvermeidlichen Verlusten, die durch magnetische Streuung eintreten, wird dann auch die zweite Spule, die sich auf dem Eisenkerne befindet, dieses wechselnde Kraftlinienfeld ebenfalls umfassen; es wird infolgedessen in dieser zweiten Spule eine EMK induziert. Sind die Enden dieser Spule durch einen Widerstand geschlossen, so wird in der zweiten Spule und im Widerstand ein Wechselstrom entstehen.

Diejenige Spule, der ein umzusetzender Wechselstrom zugeführt wird, heißt die primäre Spule oder primäre Wickelung; die Spule in der ein induzierter Wechselstrom hervorgebracht wird, der dann anderweite Verwendung finden soll, wird die sekundäre Spule oder die sekundäre Wickelung genannt.

Die EMK e_p der Selbstinduktion der ersten, primären Spule ist:

$$e_p = 2 \pi \cdot \Phi \cdot n_p \cdot \sim \cdot 10^{-8} \text{ Volt} \quad 4)$$

und die EMK e_s , die in der zweiten, sekundären Spule induziert wird:

$$e_s = 2 \pi \cdot \Phi \cdot n_s \cdot \sim \cdot 10^{-8} \text{ Volt} \quad 5)$$

Ist nun die Kraftlinienzahl Φ in beiden Ausdrücken gleich, d. h. findet keine Streuung der magnetischen Kraftlinien statt, so findet man durch Division:

$$\frac{e_p}{e_s} = \frac{n_p}{n_s} \quad 6)$$

Das Umsetzungsverhältnis der EMKräfte $\frac{e_p}{e_s}$ ist daher sehr nahe gleich $\frac{n_p}{n_s}$.

Die in den beiden dieselben Kraftlinien umschließenden Spulen tätigen EMKräfte sind den beiden Windungszahlen proportional.

Vernachlässigt man den Spannungsabfall nach dem Jouleschen Gesetze in den Wickelungen, die meist klein sind, so kann man die EMK mit den Klemmenspannungen vertauschen, denn es ist:

$$E_p = e_p + J_p \cdot w_p$$

$$E_s = e_s - J_s \cdot w_s$$

und man erhält näherungsweise

$$\frac{E_s}{E_p} = \frac{n_s}{n_p},$$

d. h. auch die Klemmenspannungen an den beiden Spulenenden sind, soweit man von magnetischer Streuung und Ohmschen Spannungsverlusten absehen darf, den Windungszahlen proportional.

Bekanntlich (vergl. Kap. 2, 1., S. 21) ist die Welle der induzierten EMK der Welle des angrenzenden Stromes und des dadurch veranlaßten Magnetfeldes um eine Viertelperiode voraus. Der in der sekundären Spule induzierte Strom ist deshalb dem in der primären Spule fließenden in jedem Momente gerade entgegengesetzt gerichtet, sie haben eine Phasendifferenz von einer halben Periode, verhalten sich zueinander wie Bild und Spiegelbild. Die von beiden Strömen erzeugten Kraftlinienfelder sind daher gerade entgegengesetzt gerichtet.

2. Geschichtliches über die Transformatoren.

Obleich schon früher Vorschläge gemacht worden waren die elektrische Energie einer Wechselstromquelle durch Induktionsapparate gleichzeitig an verschiedenen Verwendungsstellen nutzbar zu machen, so gebührt doch L. Gaulard und J. D. Gibbs das Verdienst zum erstenmale brauchbare Transformatoren in größerem Maßstabe zu diesem Zwecke hergestellt und zur praktischen Anwendung gebracht zu haben. Gelegentlich der Ausstellung in Turin im Jahre 1884 haben die Genannten durch eine in Lanzo aufgestellte Wechselstrommaschine längs einer im ganzen 80 *km* langen, aus 3,7 *mm* starkem Bronzedraht bestehenden Leitung die primären Wickelungen der Transformatoren, die in Lanzo, Venaria und Turin aufgestellt waren, mit Wechselstrom gespeist und von den sekundären Wickelungen aus an den betreffenden Orten befindliche Glühlampen und Bogenlampen in Tätigkeit gesetzt. Die Transformatoren waren aus offenen Ringen von gestanztem Kupferblech aufgebaut. In dem Hohlraume der Ringe befand sich ein Eisenkern, der verschieden tief eingesenkt werden konnte. Die vorspringenden Enden der voneinander isolierten Kupferringe waren abwechselnd miteinander verbunden, sodaß z. B. die ungeradzahligen die primäre, die geradzahligen die sekundäre Wickelung bildeten.

Zumeist hatten daher die Transformatoren von Gaulard und Gibbs das Umsetzungsverhältnis 1:1, und das war sehr wohl zugänglich, da bei diesem Verteilungssysteme die primären Windungen sämtlicher tätiger Transformatoren hintereinander geschaltet waren.

Gaulard und Gibbs haben jedoch auch schon Transformatoren gebaut, bei welchen z. B. der 1., 4., 7. . . . Ring verbunden waren und die eine Wickelung bildeten, während die übrigen Ringe, hintereinander verbunden, die andere Wickelung bildeten. Die Behauptung, daß diese Pioniere der Transformatorentechnik nur das Umsetzungsverhältnis 1:1 verwendet hätten, ist somit nicht richtig. Auch Transformatoren mit ringförmigen Eisenkernen haben sie schon auf der Ausstellung in Turin einzelnen Elektrotechnikern gezeigt. Allem Anscheine nach haben sie aber weder Transformatoren mit anderem

Umsetzungsverhältnisse als 1 : 1, noch solche mit ringförmigen Eisenkernen in technisch irgendwie erheblichem Maßstabe praktisch angewendet.

Das große Verdienst Transformatoren mit beliebigem Umsetzungsverhältnis, geschlossenem Eisenkerne und aus Drähten hergestellten Wickelungen zuerst gebaut und mit technischem Erfolge benutzt zu haben (1885), gebührt den Ingenieuren der Fabrik von Ganz & Co., den Herren Zipernowsky, Déri und Bláthy.

Während Gaulard und Gibbs die Transformatoren in Hintereinanderschaltung anwendeten und damit nur eine unvollkommene Regulierung erreichen konnten, haben Ganz & Co. von Anfang (1885) an sich der Verteilung elektrischer Energie eines Wechselstromes durch parallel geschaltete Transformatoren bedient und damit die moderne Epoche glänzender Entwicklung der Wechselstromtechnik angebahnt.

3. Die Theorie der Wechselstromtransformatoren unter Vernachlässigung der Streuung, der Hysterese und der Wirbelströme.

Einen idealen Transformator ohne Streuung und ohne Verluste durch Hysterese und Wirbelströme kann es allerdings in Wirklichkeit nicht geben; tatsächlich sind aber bei gut konstruierten derartigen Apparaten diese störenden Einflüsse von so untergeordneter Bedeutung, daß ihre Berücksichtigung nur verhältnismäßig kleine Korrekturen erfordert.

Wenn wir durch die primäre Spule eines Transformators einen Wechselstrom senden, wird in dem Eisenkern ein periodisch wechselndes Kraftlinienfeld erzeugt. Für den Fall, daß die magnetische Induktion selbst im Maximum der Feldstärke einen verhältnismäßig niedrigen Betrag nicht überschreitet, kann man ohne merklichen Fehler annehmen, daß die Permeabilität konstant und die Feldstärke der magnetomotorischen Kraft, d. h. dem Produkte aus Strömstärke und Windungszahl der Spule, proportional ist. Das magnetische Feld wird sich daher in derselben Weise periodisch ändern wie der Wechselstrom; zwischen der EMK des primären Wechselstromes und der Feldstärke besteht jedoch ein Phasenunterschied von einer Viertelperiode (vergl. Kap. 2, Abschn. 1, S. 21); das magnetische Feld ist um eine Viertelperiode gegen die EMK des Wechselstromes verspätet, der dasselbe erzeugt.

Bezeichnet man mit L_p und L_s die Selbstinduktionskoeffizienten der primären und sekundären Wickelung und mit $M = \sqrt{L_p \cdot L_s}$ den Koeffizienten der gegenseitigen Induktion beider Stromkreise

(vergl. Kap. 2, Abschn. 3, S. 31, Gl. 20), so erhält man nach Maxwell für die maximale Stärke des Primärstromes J_p den Ausdruck:

$$J_p = \frac{E_p}{\sqrt{\varrho^2 + \omega^2 \lambda^2}} \dots \dots \dots 8)$$

Die Phasenverzögerung φ des primären Stromes hinter der primären EMK bestimmt die Formel

$$\tan \varphi = \frac{\omega \lambda}{\varrho} \dots \dots \dots 9)$$

In diesen Formeln sind ϱ und λ Abkürzungen für folgende Ausdrücke:

$$\varrho = w_p + \frac{\omega^2 M^2}{w_s^2 + \omega^2 L_s^2} \cdot w_s \quad \lambda = L_p - \frac{\omega^2 M^2}{w_s^2 + \omega^2 L_s^2} \cdot L_s,$$

wobei w_p den Widerstand der primären Wicklung und w_s den Widerstand des sekundären Stromkreises bedeuten.

Da in Formel 9) λ im Zähler und ϱ im Nenner steht, ist die Phasenverschiebung im primären Stromkreise um so kleiner, je größer die sekundäre Stromstärke ist, denn ϱ ist um so größer, λ um so kleiner, je kleiner der scheinbare Widerstand des sekundären Stromes, je kleiner der Nenner $\sqrt{w_s^2 + \omega \cdot L_s^2}$ ist.

Diese Formeln gelten unter der Voraussetzung, daß an den Klemmen der primären Wicklung eine EMK

$$e = E_p \cdot \sin \omega t$$

von rein sinusoidal Form tätig ist.

Für die maximale Stromstärke J_s , die im sekundären Stromkreise herrscht, ergibt sich:

$$J_s = \frac{\omega M E_p}{\sqrt{\varrho^2 + \omega^2 \lambda^2} \sqrt{w_s^2 + \omega^2 L_s^2}} \dots \dots \dots 10)$$

Für die Phasenverzögerung χ des sekundären Stromes hinter dem primären ergibt sich:

$$\chi = 90 + \psi, \quad \tan \psi = \frac{\omega L_s}{w_s} \dots \dots \dots 11)$$

Der sekundäre Stromkreis besteht jedoch aus zwei Teilen, aus den auf dem Transformator befindlichen Windungen, deren Widerstand w_s' und deren Selbstinduktionskoeffizient L_s' sein mag, und aus der Belastung, deren Leitungswiderstand mit w_s'' und deren Selbstinduktionskoeffizient mit L_s'' bezeichnet werden soll.

Demnach ist:

$$w_s = w_s' + w_s'' \quad \text{und} \quad L_s = L_s' + L_s''.$$

Gebraucht man für die maximale sekundäre Klemmenspannung des Transformators den Buchstaben K_s , so ist $K_s = E_s - w_s' \cdot J_s$,

gleich der um den Spannungsverlust in der Sekundärspule verminderten sekundären EMK.

Zwischen J_s und K_s aber muß nach den für Wechselströme gültigen Gesetzen die Beziehung bestehen:

$$J_s = \frac{K_s}{\sqrt{w_s''^2 + \omega^2 L_s''^2}} \quad K_s = J_s \cdot \sqrt{w_s''^2 + \omega^2 L_s''^2} \quad . \quad . \quad 12)$$

Führt man hierin für J_s seinen Wert aus Gleichung 10 ein, so ergibt sich:

$$K_s = \frac{\omega \cdot M \cdot E_p}{\sqrt{\varrho^2 + \omega^2 \lambda^2}} \cdot \frac{\sqrt{w_s''^2 + \omega^2 L_s''^2}}{\sqrt{w_s^2 + \omega^2 L_s^2}} \quad . \quad . \quad 13)$$

Die Stromstärke J_s im sekundären Kreise wird nun sehr klein, wenn der Nenner in der Formel für J_s sehr groß wird, d. h. wenn entweder der äußere Widerstand, oder die Selbstinduktion, oder beide Größen gleichzeitig sehr groß sind. Da der Widerstand und der Selbstinduktionskoeffizient der sekundären Wickelung meist kleine Größen sind, kann man ohne erhebliche Fehler w_s mit w_s'' und L_s mit L_s'' vertauschen. Der zweite Bruch in der Formel für K_s wird daher näherungsweise gleich 1 gesetzt werden können.

Außerdem kann dann ebenfalls näherungsweise $\lambda = L_p$ gesetzt und ϱ gegen ωL_p vernachlässigt werden.

Dann wird angenähert

$$K_s = \frac{M}{L_p} \cdot E_p \quad . \quad . \quad . \quad 14)$$

Nun ist aber für zwei Wickelungen, die, ohne daß Streuung eintritt, dasselbe Kraftlinienfeld umfassen und sich vollständig überdecken:

$$M = \sqrt{L_p \cdot L_s} \quad . \quad . \quad . \quad 15)$$

Man erhält somit

$$\frac{E_p}{K_s} = \sqrt{\frac{L_p}{L_s}} \quad . \quad . \quad . \quad 16)$$

Der Selbstinduktionskoeffizient L einer Spule ist aber (vergl. Kap. 2, Abschn. 2, S. 29, Gl. 12) dem Quadrate der Windungszahl der Spule proportional; berücksichtigt man dies, so ergibt sich:

$$\frac{E_p}{K_s} = \frac{n_p}{n_s} = u \quad . \quad . \quad . \quad 17)$$

gleich dem Umsetzungsverhältnis, in Übereinstimmung mit der auf S. 258, Formel 6, von uns abgeleiteten Grundgleichung.

Die Klemmenspannung K_s ist nämlich von der sekundären EMK E_s meist nur wenig verschieden, sodaß man diese Differenz vernachlässigen kann.

Die Formel gilt streng, wie man sofort erkennt, wenn der sekundäre Stromkreis offen, w_s'' unendlich groß ist; aber selbst wenn der Widerstand w_s'' und die Selbstinduktion L_s'' klein, die

Belastung des Transformators aber groß ist, betragen die Fehler, die man durch diese Vereinfachungen begeht, die zur Formel 14 geführt haben, nicht mehr als etwa 3%.

Es folgt daraus, daß die sekundäre Klemmenspannung K_s eines Transformators, an dessen primären Klemmen eine konstante Spannung erhalten wird, ebenfalls nur wenig veränderlich ist.

Auf dieser Eigenschaft der Transformatoren beruht ihr hoher Wert für die Verteilung elektrischer Energie durch parallelgeschaltete derartige Apparate.

Die Phasenverzögerung des sekundären Stromes gegen die sekundäre EMK wird bestimmt durch:

$$\tan \delta = \frac{\omega L_s''}{w_s} \dots \dots \dots 18)$$

und die Phasenverzögerung φ' dieses Stromes gegen die Klemmenspannung K_s durch:

$$\tan \varphi' = \frac{\omega L_s''}{w_s''} \dots \dots \dots 19)$$

Die Richtungen dieser verschiedenen Größen sind als Vektoren in nebenstehender Fig. 207 eingetragen.

Auch den Wirkungsgrad eines solchen idealen Transformators ohne Streuung und ohne Verluste durch Hysterisis und Wirbelströme kann man leicht bestimmen.

Die zugeführte elektrische Energie A_p hat den Wert

$$A_p = J_p \cdot E_p \cdot \cos \varphi \quad 20)$$

Die an den sekundären Klemmen abgegebene elektrische Energie A_s hat die Größe

$$A_s = J_s \cdot K_s \cdot \cos \varphi' \quad 21)$$

Der Wirkungsgrad W ist somit:

$$W = \frac{J_s \cdot K_s \cdot \cos \varphi'}{J_p \cdot E_p \cdot \cos \varphi} \quad 22)$$

Nennt man v_p und v_s die Verluste durch Stromwärme in der primären und sekundären Wickelung, so kann bei einem solchen idealen Transformator für W auch der Ausdruck aufgestellt werden:

$$W = \frac{A_s}{A_s + v_p + v_s} \dots \dots \dots 23)$$

Bei einem wirklichen Transformator kommen im Nenner noch die Verluste im Eisen durch Hysterisis und Wirbelströme und zu

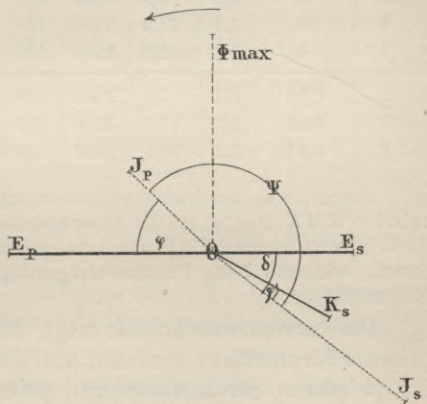


Fig. 207. Phasenunterschiede der Stromstärken, Spannungen und des Magnetfeldes bei einem belasteten Transformator.

dem ganzen Bruch ein Faktor hinzu, der wenig kleiner als 1 ist und sich auf die magnetische Streuung bezieht.

Für einen kleinen Transformator für 3 Kilowatt hat Benischke¹⁾ die vorstehenden Rechnungen durchgeführt; wir teilen in nachstehender Tabelle einen Teil der von ihm gefundenen sehr lehrreichen Zahlen mit.

Der Transformator ist für 2200 Volt bei einem Umsetzungsverhältnis $u = 20$ bestimmt, soll somit sekundär 110 Volt geben.

Es ist angenommen, daß die Periodenzahl $\sim = 48$, somit $2\pi\sim = 300$; $L_p = 4$, $L_s' = 0,01$ und somit $M = \sqrt{L_p \cdot L_s'} = 0,2$, ferner $w_p = 8 \omega$, $w_s' = 0,02 \omega$ betrage. Die Zahl der im Maximum induzierten Kraftlinien beträgt 1727000.

Äußerer Widerstand w_s'' Ohm	Sekundärer Stromkreis		Primäre Stromstärke J_p Ampère	Sekundäre Stromstärke J_s Ampère	Klemmenspannung Prim. Sekund.		Phasenverschiebungen				Wirkungsgrad W in Prozenten
	Selbstinduktion der Belastung L_s'' Henry	Henry			Volt	Volt	φ	φ'	χ	ξ	
8	0	1,8	0	2200	110	89°37'	—	—	—	0	
100	0	1,8	1,1	2200	110	87°53'	0	91°43'	90°	81,2	
20	0	1,9	5,5	2200	110	81°5'	0	98°32'	90°	95,9	
5	0	2,1	21,3	2200	107	60°33'	0	120°58'	90°	98,3	
1	0	5,6	106,0	2200	106	17°45'	0	161°13'	90°	95,4	
5	0,05	2,2	7,0	2200	110	86°38'	71°34'	164°29'	161°34'	83,3	
2	0,02	2,7	17,4	2200	110	83°30'	71°34'	167°20'	161°34'	91,4	
2	0,01	3,2	30,4	2200	109,6	73°58'	56°19'	161°24'	146°19'	95,0	

Hierin ist φ die Phasenverschiebung des primären Stromes J_p gegen die primäre EMK E_p ; φ' ist die entsprechende Größe für den sekundären Strom. Unter χ versteht man die Phasenverzögerung des sekundären gegen den primären Strom, während ξ die Phasenverzögerung des sekundären Stromes gegen das Magnetfeld ist.

Die vorstehende Tabelle zeigt, daß mit zunehmender Belastung die primäre Stromstärke zunimmt und die Phasenverschiebung φ zwischen der primären Stromstärke und primären EMK sich vermindert.

Solange die Belastung frei von Selbstinduktion ist ($L_s'' = 0$), befindet sich die sekundäre Klemmenspannung in gleicher Phase mit dem sekundären Strome. Die Phasenverzögerung φ' des sekundären Stromes hinter der sekundären Klemmenspannung ist umso größer, je größer die Selbstinduktion (L_s'') der Belastung ist; sie nähert sich schon bei mäßigen Beträgen von L_s'' einem rechten Winkel oder einer Viertelperiode.

¹⁾ G. Benischke, Magnetismus und Elektrizität, Berlin-München, Springer-Oldenbourg 1896, S. 185.

Der Wirkungsgrad W eines Transformators erreicht bei induktionsfreier Belastung ein Maximum für einen mittleren Wert und nimmt für sehr große und für sehr kleine Widerstände wieder ab, um sowohl bei offenem sekundären Kreise $w_s'' = \infty$, als auch bei Kurzschluß $w_s'' = 0$ den Wert Null anzunehmen.

Bei Belastung durch Widerstände mit Selbstinduktion sinkt mit wachsender Selbstinduktion der Wirkungsgrad.

4. Graphische Darstellung der Vorgänge im Transformator und Einfluß der Veränderlichkeit der Permeabilität.

Wenn man von der Einführung der Koeffizienten der Selbstinduktion absehen will, kann man die elementare Theorie des Transformators auch noch in etwas anderer Weise darstellen, die in einige weitere Eigenschaften dieser wichtigen Apparate Einsicht gewährt. Man geht dabei aus von dem im Eisen des Transformators erzeugten magnetischen Kraftlinienfelde.

Zur Entstehung desselben tragen sowohl die Ampèrewindungen der primären als die der sekundären Spule bei, und es ist (vergl. Grundzüge der Gleichstromtechnik VI, 4, S. 129) die erzeugte Kraftlinienzahl

$$\Phi = 0,4 \pi \cdot \frac{i_p \cdot n_p + i_s \cdot n_s}{w} \quad \dots \quad 24)$$

wenn man unter w

$$w = \frac{1}{\mu} \cdot \frac{\lambda}{Q}$$

den magnetischen Widerstand des mittleren Weges λ der Kraftlinien in einem Eisenkörper vom Querschnitte Q und der Permeabilität μ versteht. Nimmt man nun an, daß das Feld sich genau nach einer Sinusfunktion ändere, so ist:

$$\Phi = \Phi_{\max} \cdot \sin \omega t \cdot \quad (\omega = 2 \pi \sim) \quad \dots \quad 25)$$

Die in der sekundären Spule durch die Änderungen der Kraftlinienzahl induzierte EMK e_s ist alsdann

$$e_s = n_s \cdot \omega \cdot \Phi_{\max} \cdot \cos \omega t \quad \dots \quad 26)$$

Vernachlässigt man die Selbstinduktion der wenigen Windungen der sekundären Spule (setzt also $L_s = 0$), so ist:

$$i_s = - \frac{n_s \cdot \omega \cdot \Phi_{\max}}{w_s} \cdot \cos \omega t \quad \text{und} \quad J_s = \frac{n_s \cdot \omega \cdot \Phi_{\max}}{w_s} \quad \dots \quad 27)$$

Wenn man diese Werte in Gleichung 24 einsetzt und i_p berechnet, erhält man:

$$i_p = \frac{w}{0,4 \pi n_p} \cdot \Phi_{\max} \cdot \sin \omega t + \frac{n_s}{n_p} \cdot J_s \cdot \cos \omega t \quad \dots \quad 28)$$

Bezeichnet man nun mit β die Phasenvoreilung des primären Stromes gegen die Phase des magnetischen Feldes des Transformators und

nimmt man an, daß der zeitliche Verlauf der primären Stromstärke mit genügender Genauigkeit ebenfalls durch eine Sinoide dargestellt werden könne, so kann man:

$$i_p = J_p \cdot \sin(\omega t + \beta) = J_p \cdot \sin \omega t \cdot \cos \beta + J_p \cdot \cos \omega t \cdot \sin \beta \quad (29)$$

setzen.

Damit dieser Ausdruck mit dem in Gleichung 28 gegebenen identisch wird, muß

$$J_p \cdot \cos \beta = \frac{w}{0,4 \pi n_p} \cdot \Phi_{\max} \quad \text{und} \quad J_p \cdot \sin \beta = \frac{n_s}{n_p} \cdot J_s$$

sein. Dies ergibt:

$$\sin \beta = \frac{J_s \cdot n_s}{J_p \cdot n_p}, \quad \cos \beta = \frac{w \cdot \Phi_{\max}}{0,4 \pi n_p \cdot J_p}, \quad \tan \beta = \frac{n_s \cdot J_s}{w \cdot \Phi_{\max}} \quad (30)$$

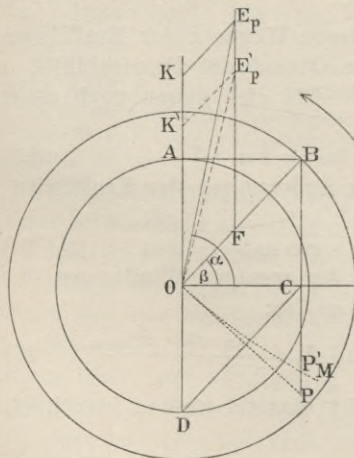
$\frac{0,4 \pi}{0,4 \pi}$

Durch Quadrieren und Addieren der für $\sin \beta$ und $\cos \beta$ erhaltenen Werte ergibt sich:

$$n_p^2 \cdot J_p^2 = n_s^2 \cdot J_s^2 + \left(\frac{w \cdot \Phi_{\max}}{0,4 \pi} \right)^2 \quad \dots \quad (31)$$

Diese Form zeigt, daß das Produkt $n_p \cdot J_p$ als Hypotenuse eines rechtwinkligen Dreieckes angesehen werden kann, dessen Katheten die sekundären Ampèrewindungen $n_s \cdot J_s$ und die Größe $\frac{w \cdot \Phi_{\max}}{0,4 \pi}$ sind.

Hierauf beruht ein von G. Kapp angegebenes und von Fleming vervollständigtes Verfahren zur graphischen Darstellung der Vorgänge im Transformator. (Vgl. Fig. 208.) Man zieht mit Radien, die in irgend einem Maßstabe den Größen $J_p \cdot n_p$ und $J_s \cdot n_s$ d. h. den primären und sekundären Ampèrewindungen proportional sind, zwei Kreise.



Konstruiert man in irgend einem Punkte A des kleineren Kreises mit dem Radius $J_s \cdot n_s$ die Tangente und verlängert diese, bis sie den größeren Kreis in B schneidet, und vervollständigt das Rechteck OABC, so ist:

$$\overline{BC} = \overline{AO} = J_s \cdot n_s$$

und $\overline{OB} = J_p \cdot n_p$,
mithin ist:

$$\sin \text{BOC} = \frac{\overline{BC}}{\overline{OB}} = \frac{J_s \cdot n_s}{J_p \cdot n_p} = \sin \beta.$$

Fig. 208. Graphische Darstellung der Vorgänge im Transformator.

Daraus folgt, daß $\angle BOC = \beta$ der Winkel ist, um den der primäre Strom dem periodisch veränderlichen Magnetfeld in der Phase vorausseilt. Ferner ist:

$$\overline{OC} = \frac{\omega \cdot \Phi_{\max}}{0,4 \pi}$$

eine der Kraftlinienzahl proportionale Größe. Sind im sekundären Stromkreise Strom und EMK in gleicher Phase, was angenähert der Fall ist, wenn der Transformator nur auf induktionsfreie Widerstände arbeitet, so ist die in der sekundären Wickelung induzierte EMK und auch der Strom gerade um 90° gegen die Phase des Magnetfeldes verzögert.

Die Strecken \overline{OB} , \overline{OC} und \overline{OD} befinden sich daher hinsichtlich der Phase in den relativen Lagen, die der primäre Strom, das Magnetfeld und der sekundäre Strom gegeneinander einnehmen.

Trägt man nun auf \overline{OB} eine Strecke ab, die der Proportion genügt:

$$\overline{OF} : \overline{OB} = w_p : n_p$$

so ist, da $\overline{OB} = J_p \cdot n_p$ ist, alsdann:

$$\overline{OF} = w_p \cdot J_p.$$

\overline{OF} ist somit der Spannungsverlust im primären Stromkreis und entspricht einer EMK, die mit dem primären Strome in gleicher Phase ist.

Die in der primären Wickelung von dem veränderlichen Felde induzierte EMK E'_p ist gerade der in der sekundären Wickelung induzierten EMK $w_s J_s$ entgegengesetzt gerichtet.

Es ist nun aber

$$E'_p = \omega \cdot n_p \cdot \Phi_{\max},$$

ferner:

$$E_s = \omega \cdot n_s \cdot \Phi_{\max} = w_s \cdot J_s$$

folglich:

$$E'_p = \frac{n_p}{n_s} \cdot w_s \cdot J_s.$$

Wir tragen daher in dem Maßstab der Volt, der durch die Größe von \overline{OF} bestimmt ist, in der Richtung von OA

$$\overline{OK} = \frac{n_p}{n_s} \cdot w_s \cdot J_s = E'_p$$

auf. Es ist dies die Komponente der primären EMK, die der Selbstinduktion des Transformators entgegenwirkt.

Vervollständigt man nun das Parallelogramm OFE_pK , so ist $\overline{OE_p}$ der Maximalwert der an den Klemmen der primären Wickelung tätigen EMK. α ist der Winkel, um den die Phase dieser EMK der Phase des Magnetfeldes vorausseilt.

Läßt man das Parallelogramm OFE_pK um O in der Pfeilrichtung rotieren, so stellt die Projektion von \overline{OE} auf eine Achse OY die

Klemmenspannung der primären Wickelung E_p für einen gegebenen Moment t dar.

An diesem Diagramm (Fig. 208) kann man den Einfluß der Änderung der Permeabilität des Eisens, der für größere Kraftliniendichten nicht vernachlässigt werden kann, veranschaulichen.

Wir denken uns zu dem Zwecke längs der Linie OC die Zahl der Ampèrewindungen der Erregung und als Ordinaten dazu die Größe $\omega n_p \Phi$ abgetragen, die der magnetischen Felddichte proportional ist. Hierdurch sei die Kurve OM entstanden, statt der Geraden OP , die gelten würde, wenn die Permeabilität konstant wäre. Einer Anzahl Ampèrewindungen, die z. B. gleich \overline{OC} wäre, entspricht dann eine induzierte sekundäre EMK $e'_p = \overline{CP'}$, während derselben Anzahl Ampèrewindungen der Wert OP entsprochen haben würde, wenn die Permeabilität konstant und daher die Felddichte der Anzahl der Ampèrewindungen genau proportional gewesen wäre.

Da $\overline{OP'}$ kleiner als \overline{OP} ist, so muß auch die EMK der Selbstinduktion OK' kleiner ausfallen als OK . Wir erhalten daher statt des Parallelogrammes OFE_pK ein kleineres Parallelogramm OFE'_pK' .

Die Abnahme der Größe μ , der Permeabilität des Eisens bei größerer Felddichte, vermindert hiernach sowohl die primäre als die sekundäre Spannung und den sekundären Strom. Außerdem werden aber auch, wie die Figur zeigt, die Phasenunterschiede verkleinert.

Da aber die Abnahme der Permeabilität sich stets nur in den Teilen einer Wechselstromperiode geltend machen wird, in der die Feldstärke sich in der Nähe ihres Maximums befindet, werden die Phasenverkleinerungen und die Verminderungen der EMK sich nur zu diesen Zeitabschnitten erheblich geltend machen.

Wenn nun der Stromerzeuger auch eine EMK liefert, die genau nach einer Sinuslinie verläuft, so folgt daraus, solange induktionsfreie Widerstände die Belastung liefern, daß die zu den Zeiten des Maximums der Feldstärke induzierten Momentanwerte der EMK verhältnismäßig geringer ausfallen und geringere Phasenverschiebungen erfahren werden, als die zu den Abschnitten der Wechselstromperiode induzierten, in der die periodisch schwankende Feldstärke gering ist. Es ergibt sich somit eine Gestaltsänderung der Wechselstromkurven und zwar nicht nur in der sekundären EMK und Stromstärke der Transformatoren, sondern auch rückwirkend in der EMK und Stromstärke des Wechselstromerzeugers, der auf Transformatoren arbeitet. (Vergl. auch Abschn. 10 dieses Kapitels.)

5. Einfluß der magnetischen Streuung.

Bei keinem Transformator ist es möglich die magnetische Streuung ganz zu vermeiden; selbst bei sorgsamster Anordnung wird es immer

eine Anzahl vom primären Strome erzeugte Kraftlinien geben, die sich schließen, ohne alle Windungen der sekundären Spule zu umfassen.

Bei gut konstruierten Transformatoren, die auf induktionsfreie Widerstände, z. B. Glühlampen arbeiten, beträgt der dadurch veranlaßte Spannungsabfall 0,5 bis 2%. Die Streuung wird um so merklicher auftreten, je mehr das Eisen sich seiner Sättigung nähert; die durch das Auftreten einer Streuung verursachte Verminderung der Spannung wird daher erst bei stärkerer Belastung merklich werden.

Eine erhebliche Streuung tritt nur ein, wenn bei übereinander liegenden Spulen die innere Spule sehr dick ist, zwischen der äußeren Spule und dem Eisenkern daher ein großer Zwischenraum ist, oder wenn die Spulen einseitig nebeneinander oder unsymmetrisch liegen. Am geringsten wird die Streuung, wenn die Spulen ganz symmetrisch zum Kerne angeordnet und über das Eisen verteilt sind, ferner, wenn beide Spulen den Eisenkern möglichst eng umschließen und übereinander übergreifen, oder wenn primäre und sekundäre Windungen in Gruppen geteilt nebeneinander abwechselnd angeordnet sind.

Die nebenstehende Fig. 209 zeigt z. B. einen Transformator mit rechteckigem Eisenrahmen, bei dem sowohl die primäre als die sekundäre Wicklung in je 4 nebeneinander liegende Spulen zerlegt ist, die abwechselnd aufeinander folgen. Da jede einzelne Spule besonders isoliert werden muß, wird durch solche Anordnungen der Wicklungsraum etwas beschränkt und die Herstellung des Transformators etwas verteuert.

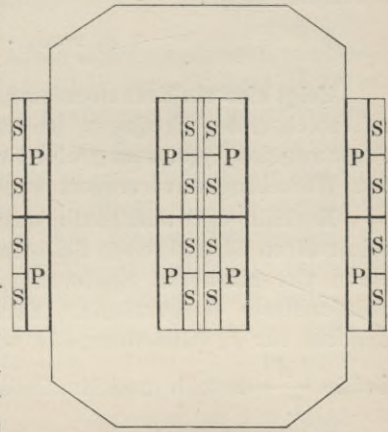


Fig. 209. Kerntransformator.

Wenn alle vom primären Strome erzeugten Kraftlinien sämtliche sekundären Windungen und alle vom sekundären Strome erzeugten Kraftlinien sämtliche primäre Windungen umfassen, so würde der Koeffizient M der gegenseitigen Induktion

$$M = \sqrt{L_p \cdot L'_s} \text{ oder } M^2 = L_p \cdot L'_s$$

sein; wobei L_p und L'_s die Selbstinduktionskoeffizienten der primären und sekundären Wicklung bedeuten.

In Wirklichkeit besteht nun aber zwischen M^2 und $L_p \cdot L'_s$ eine Differenz $\Delta \cdot L_p$

$$\Delta \cdot L_p = M^2 - L_p \cdot L'_s; \quad 32)$$

es ist $M^2 < L_p \cdot L'_s$.

Setzt man nun $M^2 = L_p \cdot (L_s)$, wobei (L_s) den Wert des Selbstinduktionskoeffizienten bezeichnet, den die sekundäre Wicklung besitzen müßte, wenn keine Streuung vorhanden wäre, so ist

$$A = \frac{M^2}{L_p} - L'_s = (L_s) - L'_s \quad 33)$$

der Unterschied zwischen diesem gedachten und dem wirklichen Selbstinduktionskoeffizienten.

Der Spannungsverlust ε_s in der sekundären Wicklung ist alsdann:

$$\varepsilon_s = J_s \cdot \sqrt{A^2 \omega^2 + w'_s{}^2} \quad 34)$$

wofür man, solange der Einfluß der Streuung $A \omega$ bei induktionsfreier Belastung gering im Vergleich zu w'_s ist, näherungsweise auch schreiben kann:

$$\varepsilon_s = J_s \cdot \left(w'_s + \frac{A^2 \cdot \omega^2}{2 w'_s} \right) \quad 35)$$

Zeigt also ein Transformator eine Zunahme des Spannungsabfalles mit wachsender Frequenz, so ist dies ein Zeichen dafür, daß die Streuung des Apparates groß ist und durch zweckmäßigere Anordnung der Wicklungen verringert werden muß.

Enthält der außerhalb des Transformators gelegene Teil des sekundären Stromkreises Selbstinduktion L''_s , so bewirkt die Streuung einen viel stärkeren Spannungsabfall, als bei Belastung durch induktionsfreie Widerstände. Es kommt in der Klammer des Ausdruckes für ε_s (Gleichung 35) noch ein weiteres Glied hinzu, das die Größe $\frac{A}{L''_s}$ enthält und an Größe $\frac{A^2 \cdot \omega^2}{2 w'_s}$ sehr überwiegt.

Bei der Anwesenheit von Selbstinduktion im äußeren Teile des sekundären Stromkreises tritt daher infolge der Streuung ein erheblicher Spannungsabfall ein, der mit steigender Belastung nur wenig wächst (derselbe beträgt in manchen Fällen bis 25%). Will man solche Spannungsänderungen vermeiden, so muß man entweder die Streuung möglichst vermindern oder die Selbstinduktion L''_s der als Belastung dienenden Elektromotoren möglichst groß machen.

Sind längere Kabel an die sekundären Klemmen des Transformators angeschlossen, so macht sich infolge der Kapazität dieser Kabel die Streuung ebenfalls geltend. Bekanntlich wirkt Kapazität wie eine negative Selbstinduktion; an Stelle des Gliedes $\frac{A}{L''_s}$ tritt daher ein negatives Glied $-A \cdot \omega^2 \cdot C$. Beim Überwiegen von Kapazität im sekundären Stromkreis wird daher die Streuung nicht einen Abfall der Spannung, sondern eine Zunahme der Spannung veranlassen.

6. Der Verlust im Eisen des Transformators.

Im Eisen eines Transformators treten zweierlei Verluste auf, die beide dem Eisengewichte direkt proportional sind. Am wichtigsten sind die unvermeidlichen Verluste durch Hysterisis; von geringerer Bedeutung sind bei genügender Unterteilung des Eisens die Verluste durch Wirbelströme.

Die Verluste durch Hysterisis sind der Anzahl der vollen magnetischen Kreisprozesse und dem Inhalte der von den beiden f förmigen Kurven eingeschlossenen Fläche proportional; da während jeder Periode des primären Wechselstromes ein solcher Kreisprozeß (vergl. Gleichstromtechnik Kap. V, 18, S. 121, und hier Kap. 8, 4, S. 107) durchlaufen wird, sind die Hysterisisverluste der ersten Potenz der Frequenz direkt proportional.

Die Wechselströme entstehen im Eisen des Transformators ebenso, wie sie in jedem zusammenhängenden Stück eines Leiters auftreten, der in ein wechselndes magnetisches Kraftlinienfeld gebracht wird. Da sie von dem Kraftlinienfelde erzeugt werden, werden sie als geschlossene Kurven die Kraftlinien umschlingen, ähnlich wie das Glied einer Kette die benachbarten Glieder umschlingt, und in der Hauptsache ähnlich verlaufen, wie die in den beiden Wickelungen des Transformators fließenden Ströme. Da die Wirbelströme induzierte Ströme sind, wird ihre EMK der Frequenz proportional sein.

Die dem Eisen durch die Wirbelströme zugeführte Wärmemenge und der durch diese Ströme verursachte Verlust wird proportional $i^2 \cdot w$ sein, wenn i die effektive Stromstärke und w der scheinbare Leitungswiderstand der Strombahn der Wirbelströme ist. Nun ist

aber auch $i = \frac{e}{w}$ und somit $i^2 \cdot w = \frac{e^2}{w}$. Der Wirbelstromverlust

ist daher dem Quadrate der EMK direkt und dem scheinbaren Widerstande umgekehrt proportional. Da die EMK der Wirbelströme der Frequenz direkt proportional war, ist somit der durch dieselben veranlaßte Verlust der zweiten Potenz der Frequenz direkt und dem scheinbaren Widerstande ihrer Bahn umgekehrt proportional. Der scheinbare Widerstand der Strombahn wird um so kleiner sein, je kleiner die magnetische Induktion \mathfrak{B} , je größer der Querschnitt und je höher die Leitungsfähigkeit des Materiales ist.

Die Hysterisisverluste können wir nicht völlig beseitigen, da selbst das beste Eisen noch deutlich diese Erscheinung erkennen läßt; man wird sie nur dadurch vermindern können, daß man eine Eisensorte mit möglichst geringer Hysterisis und großem spez. Widerstande auswählt.

Die Wirbelstromverluste lassen sich dadurch sehr abschwächen, daß man das Eisen in der Richtung, in der Wirbelströme entstehen

würden, aus dünnen Blechen, die voneinander isoliert sind, zusammengesetzt. In der Richtung, in der die magnetischen Kraftlinien verlaufen, muß aber das Eisen möglichst ununterbrochenen Zusammenhang besitzen, damit eine verhältnismäßig große Kraftlinienzahl durch eine geringe magnetomotorische Kraft erzeugt wird.

Da beide Eisenverluste dem Volumen des Eisens proportional sind, wird man auch durch Verminderung des Volumens diese Verluste verkleinern können.

Steinmetz hat gefunden, daß, wenn der magnetische Kreisprozeß sich von einer maximalen Induktion $+\mathfrak{B}_{\max}$ über Null bis $-\mathfrak{B}_{\max}$ und zurück erstreckt, die während eines solchen Kreisprozesses verbrauchte Energiemenge oder der Gesamtverlust \mathfrak{B} , der in jeder Gewichtseinheit Eisen entsteht, dargestellt werden kann durch die Formel:

$$\mathfrak{B} = \eta \cdot \sim \cdot \mathfrak{B}_{\max}^{1,6} + \xi \cdot \sim^2 \cdot \mathfrak{B}_{\max}^2 \dots \dots \dots 36)$$

Erstreckt sich die Änderung der Induktion nur auf die Grenzwerte $+\mathfrak{B}'$ und $+\mathfrak{B}''$, so ist dieser Verlust

$$\mathfrak{B} = \eta \cdot \sim \cdot \left(\frac{\mathfrak{B}' - \mathfrak{B}''}{2} \right)^{1,6} + \xi \cdot \sim^2 \cdot \left(\frac{\mathfrak{B}' - \mathfrak{B}''}{2} \right)^2$$

Hierbei ist, wie immer, \sim die Periodenzahl.

In einer Sekunde ist somit der Verlust in einer Eisenmasse, deren Volumen v ist,

$$\mathfrak{B} = v \cdot \sim \cdot (\eta \cdot \mathfrak{B}_{\max}^{1,6} + \xi \cdot \sim \cdot \mathfrak{B}_{\max}^2)$$

Der erste Teil mit dem Koeffizienten η rührt von der Hysterisis, der zweite Teil mit dem Koeffizienten ξ von den Wirbelströmen her.

Beide Teile hängen von der Größe der magnetischen Induktion und der Wechselzahl, in geringem Maße auch von der Form der Kurve der EMK ab.

Wenn man den Eisenkörper aus Blechen zusammensetzt, die nicht dicker als 0,3 bis 0,5 mm und gut voneinander isoliert sind, kann man, solange die Periodenzahl \sim nicht größer als 75 in einer Sekunde ist, von einer getrennten Berücksichtigung der Wirbelströme absehen und den gesamten Verlust im Eisen aus einer graphischen Darstellung entnehmen, wie wir eine solche auf S. 118 in Fig. 78 gegeben haben.

Für die in der Praxis häufig verwendete Dicke der Bleche von 0,5 mm und die zum Transformatorenbau üblichen Eisensorten kann für den Gesamtverlust im Eisen folgende Formel verwendet werden:

$$\mathfrak{B} = v \cdot \sim \cdot \left(0,0016 \cdot \mathfrak{B}_{\max}^{1,6} + 0,0000004 \cdot \sim \cdot \mathfrak{B}_{\max}^2 \right) \cdot 10^{-7} \quad 37),$$

wenn \mathfrak{B} in Watt und v in *cbdm* ausgedrückt wird. Für Blechstärken von 0,3 mm verwendet man für den zweiten Zahlwert 0,0000002.

Für sehr genaue Rechnungen muß man η für die verwendete Eisensorte besonders bestimmen und im zweiten Gliede statt \mathfrak{B}_{\max}^2 das Produkt $\mathfrak{B}_{\max}^2 \cdot c^2$ verwenden, wobei c der Formfaktor¹⁾ der Spannungskurve ist.

Der durch die wechselnde Magnetisierung des Eisens veranlaßte Energieverlust bleibt für alle Belastungen des sekundären Stromkreises, auch für Leerlauf, ziemlich gleich, da die Hervorbringung einer nahezu konstanten Klemmenspannung doch immer dieselbe Zahl von Kraftlinien (\mathfrak{B}_{\max}) erfordert. Bei Transformatoren, die dauernd an ein Verteilungsnetz angeschlossen und längere Zeiträume hindurch nur wenig belastet sind, muß man daher diese Eisenverluste möglichst gering machen. Der einfachste Weg dazu ist der, die Periodenzahl \sim klein zu wählen, jedoch ist dieser Weg häufig aus anderen Gründen nicht gangbar. (Vergl. Kap. 7, 1., S. 83.)

Die Hysteresisverluste hängen von dem Werte \mathfrak{B}_{\max} , die Leistung des Transformators dagegen von dem effektiven (quadratischen) Mittelwerte $\sqrt{M(e^2)}$ der EMK ab, die durch die Änderungen des Kraftlinienstromes induziert wird.

Einer sinusoidalen Form der aufgedrückten Primärspannung entspricht auch eine Änderung des Kraftlinienflusses nach einer Sinoide; einer Verzerrung der einen entspricht auch eine Verzerrung der anderen.

Hat z. B. die EMK eine Kurvenform, die sich mehr einem Trapez nähert oder abgeflacht ist (vergl. Fig. 85b, S. 128), so ändert sich der Kraftlinienfluß nicht nach einer Sinoide, sondern nach einer gebrochenen Geraden. Für einen gegebenen effektiven Wert der EMK wird dann der Maximalwert des Magnetismus größer sein als im Falle eines sinusoidalen Verlaufes.

Hat dagegen die Kurve, die den Verlauf der EMK darstellt, eine Spitze (vergl. Fig. 85d, S. 128), so wird die Welle des Kraftlinienflusses verhältnismäßig niedrig ausfallen, der Maximalwert wird geringer werden, und man wird einen kleineren Hysteresisverlust erhalten. Um also die Hysteresisverluste zu verringern, müßte man Wechselstrommaschinen anwenden, die Kurven der EMK mit spitzer Form hervorbringen. Zu erwägen ist dabei jedoch, daß Spannungskurven von spitzer Gestalt wesentlich größere Anforderungen an die Güte der Isolation der Hochspannungswicklung stellen.

Um die Eisenverluste möglichst klein zu machen, wählt man am besten Bleche aus einem nicht völlig reinen, oxydfreien Eisen. Solches Eisen besitzt nämlich einen viel höheren spezifischen Widerstand für elektrische Ströme als ganz reines Eisen und ist daher dem Auf-

¹⁾ Vergl. Kap. 1. 8., S. 13.

treten von Wirbelströmen weniger günstig. Außerdem zeigt unreines Eisen weniger die unangenehme Eigenschaft des Alterns d. i. eine allmähliche Zunahme der Hysteresisverluste bei dauernder Erwärmung. Nachdem die Bleche zurecht geschnitten sind, werden sie auf 950° C. unter Luftabschluß erhitzt und hierauf rasch abgekühlt.¹⁾

Da bei höheren Temperaturen (60 bis 200° C.) die magnetischen Eigenschaften des Eisens sich merklich (bis 50 %) infolge des Alterns verschlechtern, soll man im Betrieb die Transformatoren nicht über 60° warm werden lassen.

Neuerdings wird unter dem Namen Transformatorenblech ein Eisenblech in den Handel gebracht, welches bei der Herstellung einen erheblichen Zusatz von Aluminium (2,5 %) erhalten hat. Die Permeabilität solchen Eisens ist höher als die des besten schwedischen und die Hysteresisverluste sollen wesentlich kleiner sein. Auch die Erscheinung des Alterns der Bleche soll weniger störend hervortreten.

Jedenfalls hängt die Größe der Hysteresisverluste aber mehr von den physikalischen als von den chemischen Eigenschaften des Eisens ab. Denn in derselben Blechtafel kommen Unterschiede in den magnetischen Eigenschaften an verschiedenen Stellen vor, die bis 30 % erreichen können. Am besten sind die magnetischen Eigenschaften im Innern der Blechtafeln und parallel zur Walzrichtung. Durch Erschütterungen der Transformatoren werden, zumal bei geringen Sättigungen, die Hysteresisverluste verkleinert.

7. Die Kupferverluste im Transformator.

Sowohl in der primären, als in der sekundären Wickelung eines Transformators entsteht ein mit der Belastung zunehmender Spannungsverlust dadurch, daß bei zunehmender Belastung beide Stromstärken steigen (vergl. d. Tabelle S. 264) und mit diesen die Ohmschen Spannungsverluste $J_p \cdot w_p$ und $J_s \cdot w_s$ zunehmen. — Während also, wie vorhin mitgeteilt wurde, die Eisenverluste des Transformators für alle Belastungen nahezu dieselben bleiben, nehmen die Kupferverluste mit der Belastung zu.

Streng genommen, müßte bei der Bestimmung der Spannungsverluste statt der Widerstände der beiden Wickelungen w_p und w_s deren Impedanz eingesetzt werden; da diese Impedanzen aber, solange die Drähte nicht zu dick sind und die Wechselzahl nicht zu hoch ist, nur um wenige Prozent von dem Widerstande abweichen und die Spannungsverluste wiederum nur wenige Prozent der Spannung aus-

¹⁾ Einzelne Fabriken verwerfen das Ausglühen der Bleche vor der Verwendung, weil bei gewissen Eisensorten dadurch das Altern der Bleche begünstigt wird. Durch Vorversuche muß man das zu verwendende Material darauf hin prüfen.

machen, so kann man bei unserer elementaren Behandlung des Gegenstandes die etwas reichlich bemessenen Widerstände der Wickelungen ohne weiteres der Berechnung der Kupferverluste zu Grunde legen. Ist man genötigt, größere Kupferquerschnitte zu verwenden (über 5 mm Dicke), so stellt man, um Wirbelstromverluste in dem Leitungsmaterial möglichst zu vermeiden, die Wickelungen der Transformatoren aus einzelnen Drähten von etwa 2,5 mm Dicke her und isoliert die Leitungen durch einen Schellack- oder Emaillefarbenanstrich voneinander.

Will man erheblichere Spannungsabfälle durch Stromwärme vermeiden, damit die sekundäre Klemmenspannung bei verschiedener Belastung und konstanter primärer Spannung sich möglichst wenig ändert, so muß man die Kupferverluste gering machen.

Der Energieverlust in den Windungen ist den Quadraten der Stromstärken proportional.

Bei Belastung des sekundären Stromkreises mit induktionsfreien Widerständen (z. B. Glühlampen) fällt der sekundäre Strom in der Phase völlig mit der sekundären Klemmenspannung zusammen.

Bei höheren Belastungen kann auch der primäre Strom und die primäre Klemmenspannung als in der Phase zusammenfallend angesehen werden. Bei Leerlauf des Transformators, also bei offenem sekundären Stromkreis, tritt jedoch eine Phasenverschiebung zwischen primärem Strom und Spannung ein; die Verschiebung würde 90° betragen, wenn die Magnetisierung des Eisens keine Verluste veranlaßte; da aber Hysterisis- und Wirbelstromverluste vorhanden sind, beträgt dieselbe meist zwischen 30 und 60°. Der Leerlaufstrom ist bei gut gebauten Transformatoren gering, meist nur 2 bis 4% von dem Primärstrom bei Vollbelastung.

8. Gesamtverlust, Wirkungsgrad, Leistungsfaktor des Transformators.

Die Effektaufnahme an den Klemmen der primären Wickelung eines Transformators, $E_p \cdot J_p$, muß gleich der Summe aus der an den Klemmen der sekundären Wickelung abgegebenen Leistung $E_s \cdot J_s$, den Verlusten im Kupfer und den Verlusten im Eisen sein. Man erhält somit:

$$\begin{aligned}
 \underbrace{E_p \cdot J_p}_{\text{Effektaufnahme}} &= \underbrace{E_s \cdot J_s}_{\text{sekundäre Leistung}} + \underbrace{J_p^2 \cdot w_p + J_s^2 \cdot w_s}_{\text{Verluste im Kupfer}} + \underbrace{v \cdot \sim \cdot (\eta \cdot \mathfrak{B}_{\max}^{1,6} + \sim \xi c^2 \mathfrak{B}_{\max}^2)}_{\text{Verluste im Eisen}} \dots 38)
 \end{aligned}$$

Setzt man nun:

$$E_p \cdot J_p = A_p \qquad E_s \cdot J_s = A_s \dots 39)$$

so ist:

$$W = \frac{A_s}{A_p} \dots \dots \dots 40)$$

der Wirkungsgrad des Transformators.

Vernachlässigt man die geringen Energieverluste im Kupfer und bezeichnet die Eisenverluste mit \mathfrak{B} , so hat man näherungsweise:

$$A_p = A_s + \mathfrak{B} \dots \dots \dots 41)$$

Stellt man daher (vergl. Fig. 210) die primäre Effektaufnahme als Funktion der abgegebenen Leistung dar, so erhält man unter Vernachlässigung der Verluste im Kupfer eine gerade Linie unter

45° , die bei dem Werte \mathfrak{B} die Ordinatenachse der A_p schneidet. \mathfrak{B} ist der Leerlaufaufwand d. i. die Leistung, die der Transformator für Überwindung der Hysterisis und Wirbelströme beansprucht, auch wenn er unbelastet ist.

In Wirklichkeit gilt für A_p die höher gelegene gestrichelte Linie, bei welcher auch die Verluste im Kupfer berücksichtigt sind. Stellt

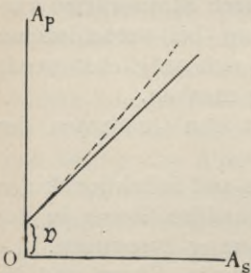


Fig. 210. Der aufgenommene primäre Effekt A_p als Funktion der sekundär abgegebenen Leistung eines Transformators.

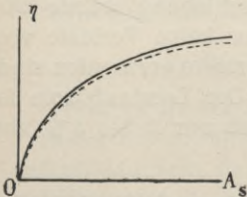


Fig. 211. Wirkungsgrad eines Transformators in seiner Abhängigkeit von der sekundär abgegebenen Leistung.

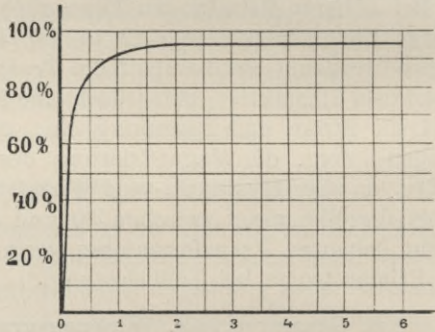


Fig. 212. Belastung in Kilowatt. Abhängigkeit des Wirkungsgrades eines Transformators von der Belastung. Wirkungsgrad W in Prozenten.

man den Wirkungsgrad W als eine Funktion der sekundär abgegebenen Leistung dar, so ist:

$$W = \frac{A_s}{A_p} = \frac{A_s}{A_s + \mathfrak{B}} \dots \dots \dots 42)$$

Da man \mathfrak{B} sehr nahe als eine Konstante ansehen kann, so ist die in Fig. 211 dargestellte ausgezogene Kurve eine Hyperbel. Berücksichtigt man die Kupferverluste, so wird W durch die tiefer gelegene punktierte Linie dargestellt. Die Differenz der beiden Kurven wächst mit zunehmender Stromstärke im sekundären Kreise.

Die Fig. 212 zeigt den Verlauf des Wirkungsgrades bei einem ausgeführten Transformator.

Da Transformatoren selten voll belastet sind, aber Tag und Nacht unausgesetzt an Wechselstromnetze angeschlossen bleiben, bildet der Leerlaufstrom und Leerlaufverlust die Quelle eines fortdauernden, unwirtschaftlichen Aufwandes, der bei der Beurteilung der Wirtschaftlichkeit einer Energieverteilung durch Wechselstrom oder Drehstrom unbedingt in Betracht gezogen werden muß.

Am einfachsten geschieht diese Berücksichtigung dadurch, daß man den Jahreswirkungsgrad η' bildet. Es ist:

$$\eta' = \frac{\text{Sekundäre Nutzarbeit für 1 Jahr}}{\text{Primär eingeleitete Arbeit für 1 Jahr}} \quad . \quad . \quad 43)$$

Die von den primären Klemmen des Transformators aufgenommene Arbeit A_p ist: $A_p = E_p \cdot J_p \cdot F$, wenn man mit F den Leistungsfaktor des Transformators bezeichnet. Hieraus folgt:

$$F = \frac{A_p}{E_p \cdot J_p}$$

Nun besteht aber J_p aus zwei Teilen, die sich auf folgende Weise unterscheiden lassen.

Das magnetische Leerlaufsfeld ergibt sich aus der Differenz der primären und der sekundären magnetomotorischen Kraft, diese ist:

$$\frac{0,4 \pi \cdot n_p}{\lambda} \cdot J_{o \max} = \frac{0,4 \pi \cdot n_p}{\lambda} \cdot J_{p \max} - \frac{0,4 \pi \cdot n_s}{\lambda} \cdot J_{s \max} \quad 44)$$

wobei $J_{o \max}$ die maximale Leerlaufstromstärke und λ die Kraftlinienlänge bezeichnet, die bei Transformatoren meist für die primäre und sekundäre Spule gleich groß ist.

Daraus folgt:

$$n_p \cdot J_{o \max} = n_p \cdot J_{p \max} - n_s \cdot J_{s \max}$$

oder in effektiven Werten, wenn wir uns die Gleichung beiderseitig mit dem Scheitelfaktor K (vergl. Kapitel 1, 8, S. 13) multipliziert denken:

$$J_o = J_p - \frac{n_s}{n_p} \cdot J_s \quad . \quad . \quad . \quad 45)$$

Daraus folgt für den primären Strom:

$$J_p = J_o + \frac{n_s}{n_p} \cdot J_s \quad . \quad . \quad . \quad 46)$$

Setzen wir in den Ausdruck für den Leistungsfaktor des Transformators diesen Ausdruck für J_p ein, so ergibt sich, wenn man im Zähler die geringfügigen Energieverluste durch Stromwärme im Kupfer vernachlässigt:

$$F = \frac{A_s + \mathfrak{B}}{E_p \cdot J_o + E_p \cdot \frac{n_s}{n_p} \cdot J_s} \quad . \quad . \quad . \quad 47)$$

Nun ist aber sehr angenähert (vergl. dieses Kapitel, Abschn. 3, S. 262)

$$E_s = \frac{E_p \cdot n_s}{n_p}$$

somit:
$$F = \frac{A_s + \mathfrak{B}}{E_p \cdot J_o + E_s \cdot J_s} = \frac{A_s + \mathfrak{B}}{E_p \cdot J_o + A_s} \quad . . . 48)$$

Da \mathfrak{B} und $E_p \cdot J_o$ bei allen Belastungen nahezu gleich sind, wird die Abhängigkeit des Leistungsfaktors F von A_s wiederum durch einen Hyperbelbogen dargestellt, der die Ordinatenachse in einer kleinen Entfernung über dem Nullpunkte schneidet.

9. Vorausberechnung des Wirkungsgrades eines gegebenen Transformators für eine bekannte Belastung.

Wir betrachten als Beispiel einen Transformator für 10 Kilowatt mit dem Umsetzungsverhältnis 20, bei dem die Primärspannung 2000 Volt, die Sekundärspannung rund 100 Volt sein soll. Bei Vollbelastung soll der Kupferverlust in jeder Wickelung 1%, also 100 Watt, der Verlust im Eisenkern 2%, d. i. 200 Watt, betragen. Die Widerstände der Wickelungen ergeben sich daraus angenähert zu:¹⁾

$$n_p = 4 \omega \quad n_s = 0,01 \omega.$$

Soll der unbelastete Transformator eine sekundäre Klemmenspannung von 100 Volt geben, und nehmen wir in diesem Falle eine Phasenverschiebung zwischen dem primären Strome und seiner Spannung von 45° an, so ist bei Leerlauf

$$J_p \cdot 2000 \cdot \cos 45 = 200 \quad J_p = \frac{200}{2000 \cdot \cos 45} = 0,14 \text{ Ampère.}$$

Bei Vollbelastung muß in der primären Wickelung

$$A_p = 10000 + 200 + 100 + 100 = 10400 \text{ Watt}$$

geleistet werden, damit an den Klemmen der sekundären Wickelung 10000 Watt zur Verfügung stehen.

Der primäre Strom ist dann bei Vollbelastung $\frac{10400}{2000} = 5,2 \text{ Amp.}$

An den sekundären Klemmen stehen, da je 1% der Spannung in den beiden Wickelungen verloren geht und die Streuung vernachlässigt werden soll, nur noch $100 - 2 = 98 \text{ Volt}$ zur Verfügung.

Der sekundäre Strom beträgt daher:

$$J_s = \frac{10000}{98} = 102,0 \text{ Ampère.}$$

¹⁾ Es ist nämlich näherungsweise $A_p = 10000 \text{ Watt}$, $E_p = 2000$, folglich $J_p = 5 \text{ A}$, somit, weil $J_p^2 \cdot w_p = 100 \text{ Watt}$ sein soll, $w_p = \frac{100}{25} = 4 \omega$.

Entsprechend ist $J_s \cdot E_s = 10000$, $E_s = 100$, folglich $J_s = 100$ und weil $J_s^2 \cdot w_s = 100 \text{ Watt}$ $w_s = \frac{100}{10000} = 0,01 \omega$.

Der Wirkungsgrad W in Prozenten bei Vollbelastung beträgt:

$$W = 100 \cdot \frac{A_s}{A_p} = 100 \cdot \frac{10000}{10400} = 96,1\%$$

Um die Berechnung für halbe Belastung durchzuführen, bestimmen wir zunächst die primäre Stromstärke aus der Leistung und aus der primären Spannung

$$J_p = \frac{5000 + 200 + \text{den unbekanntten Kupferverlusten}}{2000},$$

das gibt näherungsweise, wenn wir zunächst die unbekanntten Kupferverluste unberücksichtigt lassen:

$$J_p = 2,6 \text{ Ampère.}$$

Daraus ergibt sich angenähert der Energieverlust V_p durch Stromwärme in der primären Wickelung:

$$V_p = w_p \cdot J_p^2 = 4 \cdot 2,6^2 = 27,0 \text{ Watt.}$$

Der Spannungsverlust ϵ_p wäre

$$\epsilon_p = w_p \cdot J_p = 4 \cdot 2,6 = 10,4 \text{ Volt, d. i. von 2000 rund } 0,5\%.$$

Die sekundäre Stromstärke berechnen wir zuerst angenähert aus der Leistung, gleich der Hälfte der Vollbelastung, d. i. 5000 Watt, und aus der Klemmenspannung

$$J_s = \frac{5000}{100 - 0,5} = \frac{5000}{99,5} = 50,3 \text{ Ampère.}$$

Dies ergibt an Wattverlust und Spannungsverlust in der sekundären Wickelung:

$$W_s = w_s \cdot J_s^2 = 0,01 \cdot 50,3^2 = 25,3 \text{ Watt. } \epsilon_s = 0,01 \cdot 50,3 = 0,5 \text{ Volt.}$$

In erster Annäherung beträgt hiernach der gesamte Verlust im Kupfer durch Stromwärme $27,0 + 25,3 = 52,3$ Watt.

Damit wiederholen wir die Bestimmung der primären Stromstärke und finden:

$$J_p = \frac{5000 + 200 + 52,3}{2000} = \frac{5252,3}{2000} = 2,63 \text{ Ampère.}$$

Der Spannungsverlust ϵ_p wird:

$$\epsilon_p = w_p \cdot J_p = 10,3 \text{ Volt.}$$

Hieraus ergibt sich nach dem Umsetzungsverhältnis 20 für die sekundäre Wickelung ein Spannungsverlust von $\frac{10,3}{20} = 0,51$ Volt.

Der sekundäre Strom wird:

$$J_s = \frac{5000}{100 - 0,5 - 0,5} = \frac{5000}{99} = 50,5 \text{ Ampère.}$$

und der neu berechnete Spannungsverlust in der sekundären Wickelung:

$$\epsilon_s = w_s \cdot J_s = 0,01 \times 50,5 = 0,5 \text{ Volt.}$$

Die sekundäre Klemmenspannung wird hiernach bei halber Belastung 99,0 Volt betragen.

Der Wirkungsgrad W in Prozenten wird in diesem Falle:

$$W = 100 \cdot \frac{5000}{5252,3} = 95,2\%$$

10. Verzerrung der Gestalt der Stromkurve infolge der Hysterisis.

Wenn die an den Klemmen der Primärwicklung eines leerlaufenden Transformators wirksame EMK genau den Verlauf einer Sinuslinie besitzt, wird auch der Kraftlinienstrom, der im Eisenkern des Transformators hervorgerufen wird, sich genau nach einer Sinoide ändern; die Stromkurve aber wird infolge der Wirksamkeit der Hysterisis einen wesentlich veränderten Charakter zeigen müssen.

Wir entnehmen der Sinuskurve, die den Verlauf der Kraftlinien $\mathfrak{B} = \mathfrak{B}_{\max} \cdot \sin \omega \cdot t$ zu verschiedenen Zeitpunkten t darstellt, die zugehörigen Werte von \mathfrak{B} ,

bestimmen aus den aus der Gleichstromtechnik reproduzierten Hysterisischleifen für verschiedene Werte von \mathfrak{B}_{\max} die zugehörigen Werte von \mathfrak{H} (vergl. Fig. 213),

$$\mathfrak{H} = \frac{4\pi}{10} \times \text{Ampère-}$$

windungszahl,

oder die ihnen proportionalen Werte der Ampèrewindungen für 1 cm Länge des Kraftlinienweges und ermitteln daraus die zugehörigen, proportionalen Momentanwerte des magnetisierenden Stromes i_M .

Auf diese Weise sind für die Werte

$$\mathfrak{B}_{\max} = 2000 \quad 6000 \quad 10000 \quad 16000$$

und zugehörige Werte der magnetomotorischen Kraft

$$\mathfrak{H} = 1,8 \quad 2,8 \quad 4,3 \quad 20$$

die Linien H in Fig. 214 bis 219 entstanden.

Die Maxima der gezeichneten H-Kurven stimmen mit den Maxima der \mathfrak{B} -Kurven überein und liegen um 90° in Phase hinter den Maxima der an den sekundären Klemmen wirksamen EMK.

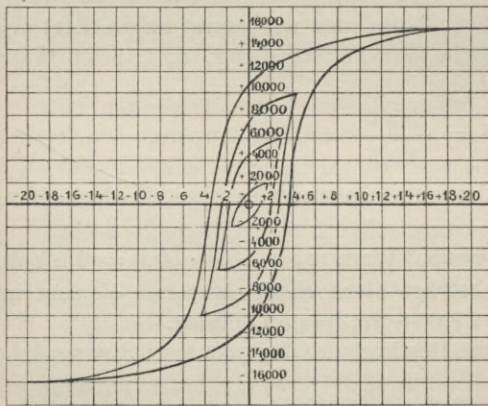


Fig. 213. Hysterisischleifen für verschiedene Werte von \mathfrak{B}_{\max} .

Man erkennt aber sofort, wenn man die Figuren 214, 215, 216, 217¹⁾ vergleicht, daß je größer die magnetische Maximalinduktion \mathfrak{B}_{\max} wird, sich die Kurven H, die dem magnetisierenden Strome i_M proportional sind, um so mehr zuspitzen. Auf der Seite des wachsenden Stromes sind die H-Kurven ausgebaucht und auf der Seite des abnehmenden Stromes ausgehöhlt. Die Stromkurve erhält mehr und mehr eine Spitze, je näher man der Sättigung kommt. Wenn bei $\mathfrak{B}_{\max} = 16000$ die magnetische Sättigung nahezu erreicht wird, gehören eben schon viel größere Werte der Stromstärke dazu,

Fig. 214.

Fig. 216.

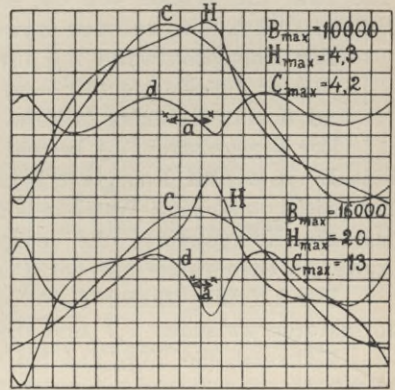
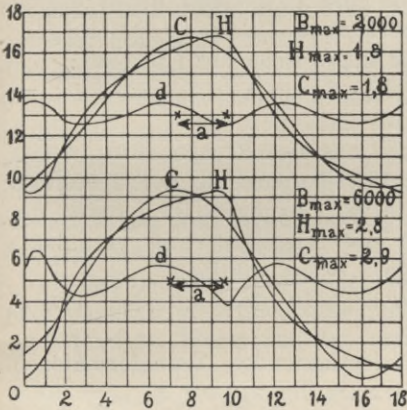


Fig. 215.

Fig. 217.

Verzerrung der Stromwelle bei leerlaufenden Transformatoren.

um noch ein geringfügiges Anwachsen des Magnetismus herbeizuführen. Der Durchgang der H-Kurven durch die Nullage erfolgt um 42° , 52° , 50° und 41° früher als der Durchgang der Sinuskurven der Magnetisierung.

Die Kurven der Fig. 214 bis 218 sind übrigens nicht in gleichem Maßstabe gezeichnet, denn die Maximalwerte der magnetomotorischen Kraft, die den Werten der \mathfrak{B}_{\max} von 2000, 6000, 10000, 16000 Kraftlinien entsprechen, verhalten sich, wie schon vorher mitgeteilt wurde, wie 1,8, 2,8, 4,3 und 20,0 Ampèrewindungen für 1 cm Eisenlänge. Um daher die \mathfrak{H} -Kurven in ungefähr gleicher Größe zu erhalten, stehen die Einheiten der Ordinaten im Verhältnis von 8 : 6 : 4 : 1.

Die gleichzeitig in den Diagrammen mitgezeichneten C-Kurven sind rein sinoidal verlaufende Stromkurven, die gleiche effektive Mittelwerte haben, also demselben Energieaufwande entsprechen, wie die H-Kurven; sie sind diesen also äquivalent.

¹⁾ Die Kurven sind Steinmetz, Theory and Calculation of Alternating Current Phenomena, S. 111 entnommen.

Die endlich mit d bezeichneten Kurven sind die Differenzen zwischen der C -Kurve und H -Kurve desselben Diagramms.

Die d -Kurven geben sämtlich drei Wellen auf die Länge der horizontalen Strecke, die bei den C - und H -Kurven einer vollen Periode (360° oder 2π) entsprechen. Durch den Einfluß der Hysterisis wird somit eine Kurve zugefügt, die sich proportional $\sin(3\omega t + \Theta)$ ändert, also einer dreifachen Periodenzahl $3 \sim$ entspricht.

Die äquivalente sinoidale Stromkurve C ist nicht mit der Sinuskurve des Magnetismus in gleicher Phase, sondern sie eilt um eine Zeit, die dem Winkel α entspricht, der Kurve des Magnetismus voraus und zwar um Winkel von $34, 48, 38$ und 16° . Man nennt diesen Winkel α den Winkel der hysteretischen Phasenvoreilung.

Der Energieaufwand A_M für die Magnetisierung ist somit:

$$A_M = J_M \cdot E \cdot \cos(90 - \alpha) = J_M \cdot E \cdot \sin \alpha = J_M \cdot E \cdot F_0$$

(E und J sind effektive Mittelwerte).

Der Erregerstrom J_M besteht somit aus zwei Komponenten, deren eine $J \cdot \sin \alpha$ dem Energieverbrauch für Überwindung der Hysterisis entspricht, also eine Wattkomponente ist. Dagegen ist $J \cos \alpha$ die wattlose Komponente, die lediglich die Magnetisierung veranlaßt. Auch die Stromwelle mit der Periode $3 \sim$ ist wattlos.

Der Leistungsfaktor $F_0 = \sin \alpha$ liegt bei leerlaufenden Transformatoren zwischen $0,7$ und $0,8$.

Während die Fig. 214 bis 217 leerlaufenden Transformatoren angehörten, ist in dem folgenden Diagramm Fig. 218 für $\mathfrak{B}_{\max} = 6000$

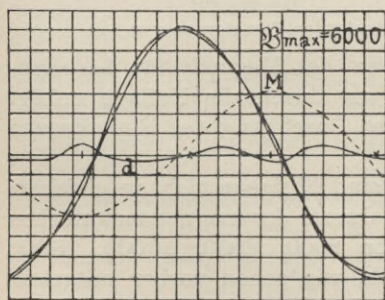


Fig. 218. Verzerrung der Stromkurve eines Transformators, der mit $1/10$ der Höchstbelastung arbeitet.

die Kurve der \mathfrak{H} oder die Stromkurve und die ihr äquivalente Sinuslinie C für einen Transformator bei $1/10$ der Vollbelastung abgebildet (der Maßstab der Ordinaten ist jedoch nur $1/3$ des in Fig. 215 angewendeten). Die durch Hysterisis veränderte H -Kurve stimmt fast völlig mit der äquivalenten Sinuskurve überein und hinkt der Linie des Magnetismus M um 72° nach. Die gestrichelte Linie M stellt nämlich die Kurve des Magnetismus dar.

Die d -Linie der Differenzen erscheint infolge des im Verhältnis $1/3$ verringerten Maßstabes ganz abgeschwächt, zeigt aber noch deutlich die dreifache Periodenzahl.

Man erkennt hieraus, daß mit zunehmender Belastung des Transformators die Abweichung der Stromkurve von einer Sinoide mehr und mehr abnimmt.

Auch das Diagramm Fig. 219, welches sich auf den Fall einer Drosselspule bezieht, bei der sich auf dem Kraftlinienpfad ein Luftspalt von $\frac{1}{400}$ Länge des Weges der Kraftlinien im Eisen befindet, und in welchem ebenfalls $B_{\max} = 6000$ und der Maßstab der Ordinate $\frac{1}{3}$ von dem in Fig. 215 angewendeten ist, zeigt nur geringe Abweichungen der H-Linie von der äquivalenten Sinoide (C). Die C-Linie eilt in diesem Falle nur um 9° der Linie M des Magnetismus voraus.

Von besonderem Interesse ist es zu bemerken, daß in den stark verzerrten \mathfrak{H} -Linien der Figuren 214, 215, 216, die sich auf Fälle beziehen, in dem das Eisen noch weit von der Sättigung entfernt ist, die Maximalwerte der äquivalenten Sinuslinien C an Größe sehr nahe mit den Maximalwerten der H-Kurven übereinstimmen. Nur in Fig. 217, welche dem Falle entspricht, daß das Eisen der Sättigung sehr nahe kommt, ist \mathfrak{H}_{\max} wesentlich größer als C_{\max} .

Unterhalb der Sättigung kann man daher ohne erheblichen Fehler die effektiven Werte aus den maximalen durch Division mit $\sqrt{2}$ ableiten und die Welle, welche die Periodenzahl $3 \sim$ besitzt, vernachlässigen. — Nur wenn Resonanzerscheinungen in Frage kommen (vergl. Kapitel 4, 2, S. 59), kann die Existenz der d-Kurve mit der dreifachen Periodenzahl zu merklichen Störungen Anlaß geben.

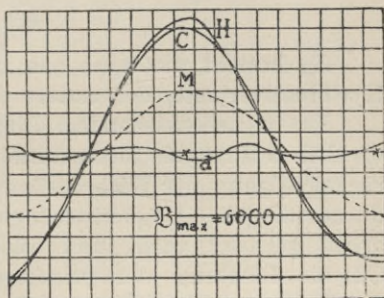


Fig. 219. Verzerrung der Stromkurven bei einer Drosselspule, in der sich ein Luftspalt von $\frac{1}{400}$ der Länge der Kraftlinienmenge im Eisen befindet.

11. Der Leerlaufstrom eines Transformators.

Zumal bei Transformatoren, die an Beleuchtungszentralen angeschlossen und unausgesetzt in Betrieb sind, ist es von Wichtigkeit, daß der Leerlaufstrom gering ist, damit in den Tagesstunden und späteren Nachtzeiten, in welchen wenig oder gar keine Lampen brennen, nicht ein beträchtlicher Energieaufwand erforderlich ist.

Der Leerlaufstrom besteht aus zwei Komponenten. Die eine derselben J_M ist der Strom, der zur Erzeugung des periodisch schwankenden Kraftlinienfeldes erforderlich ist. Die EMK dieses Stromes hat aber eine um 90° von der Stromstärke verschiedene Phase, und der erforderliche Energieaufwand ist daher null. Es ist J_M somit eine wattlose Komponente des Stromes. (Vergl. Kapitel 1, Abschnitt 9, S. 19 und Kapitel 2, Abschnitt 1, S. 28).

Die andere Stromkomponente J_H aber fällt mit der EMK in der Phase zusammen und dient dazu, die Verluste durch Hysterisis und Wirbelströme zu decken.

Der Leerlauf- oder Erregerstrom J_0 ist die Resultante aus zwei um 90° gegeneinander verschobenen Komponenten:

$$J_0 = \sqrt{J^2_M + J^2_H} \dots \dots \dots 49)$$

Die Größe der Komponente J_H ermittelt man aus dem Eisenverlust \mathfrak{B}_s , den man bei einem zu konstruierenden Transformator kennt, oder bei einem gegebenen Apparate durch Messungen mit einem Wattmeter bestimmt. Es ist

$$J_H = \frac{\mathfrak{B}}{e_p} \dots \dots \dots 50)$$

J_H besteht wiederum aus zwei Teilen; der eine entspricht dem Hysterisisverluste, der andere dem Verluste durch Wirbelströme.

Ist in nebenstehendem Diagramm Fig. 220 z. B. $CB = J_c$ die wirklich auftretende Stromstärke, $OB = J$ die Stromstärke ohne Berücksichtigung der Wirbelströme, durch die die Magnetisierungsarbeit geleistet wird, und wäre OD die Richtung der primären EMK, so ist $\cos FOB$ der Leistungsfaktor des Stromes J , $\cos FCB$ der Leistungsfaktor des wegen des Auftretens der Wirbelströme korrigierten Stromes J_c , $J \cdot \cos FOB = OF = J_H$ die Wattkomponente des Magnetisierungsstromes; auf ihr steht senkrecht die wattlose Komponente J_M , die allein vorhanden sein würde, wenn keine Hysterisis vorhanden wäre.

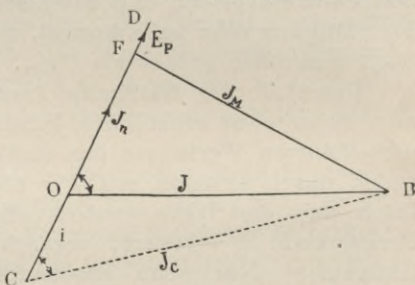


Fig. 220. Diagramm des Leerlaufstromes eines Transformators.

Nennt man die für Wirbelströme verbrauchte Stromstärke i , so ist somit:

$$J_H = i + J_n \dots \dots \dots 51)$$

die Wattkomponente.

Die Wattkomponente des Leerlaufstromes ist eine so kleine Größe, daß die Stromwärme derselben vernachlässigt werden kann.

Die Stromstärke J_M kann aus der Gleichung:

$$J_{max} = \frac{\mathfrak{H}_{max} \cdot \lambda}{0,4 \pi \cdot n} \text{ Amp.} \quad J_M = K \cdot J_{max}$$

berechnet werden, wobei K den Scheitelfaktor $K = \frac{\mathcal{V}_M(J_t^2)}{J_{max}}$ der Stromkurve bezeichnet.

\mathfrak{H}_{max} bestimmt man aus den Kurventafeln, in welchen für die betreffende Eisensorte der Zusammenhang zwischen \mathfrak{H}_{max} und \mathfrak{B}_{max}

graphisch dargestellt ist (vergl. Grundzüge der Gleichstromtechnik, Kap. V, 16., S. 116, Fig. 48).

\mathfrak{B}_{\max} aber ermitteln wir aus der Formel:

$$\mathfrak{B}_{\max} = \frac{c \cdot E_p}{4 n \sim Q} \dots \dots \dots 52)$$

in welcher E_p die effektive Primärspannung, c der Formfaktor der Stromkurve $c = \frac{M(J_t)}{J_{\text{eff}}}$, n die Windungszahl, \sim die Periodenzahl und Q der wirkliche Eisenquerschnitt ist.

Beispiel: Für einen Versuchstransformator, dessen Abmessungen Fig. 221 veranschaulicht, sei $E_p = 110$ Volt, $n_p = 130$ Windungen, $\sim = 50$ Perioden, die mittlere Länge des Kraftlinienweges (gestrichelt in der Figur eingezeichnet) beträgt $\lambda = 94,5$, das wirkliche Eisenvolumen $v = 5793$ *ccm*. Der Querschnitt beträgt $65,3$ *qcm*, davon sind aber 10% für die Papierzwischenlagen zwischen den Eisenblechen abzurechnen. Wir setzen somit $Q = 65,3 \cdot 0,9 = 58,8$ *qcm*.

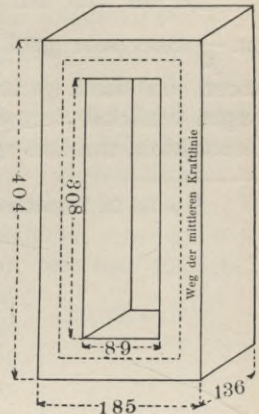


Fig. 221. Eisenkern eines Kerntransformators.

Der Formfaktor sei $c = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} = 0,9$. Wir erhalten dann zuerst:

$$\mathfrak{B}_{\max} = \frac{c \cdot E_p}{4 n_p \cdot \sim Q} \cdot 10^8 = \frac{0,9 \cdot 110 \cdot 10^8}{4 \cdot 130 \cdot 50 \cdot 58,8} = 6480.$$

Aus der Hysteresiskurve für das verwendete Eisenblech findet man, daß zu $\mathfrak{B} = 6480$ ein Wert von $\mathfrak{H} = 1,53$ gehört.

Nunmehr ist weiter:

$$\frac{n_p \cdot J}{\lambda} = \frac{\mathfrak{H}}{0,4 \pi} \quad J_{\max} = J \sqrt{2},$$

folglich:

$$J_{\max} = \frac{1,53 \sqrt{2}}{0,4 \cdot \pi} \cdot \frac{\lambda}{n_p} = \frac{1,53 \sqrt{2}}{0,4 \cdot \pi} \cdot \frac{94,5}{130} = 1,25 \text{ Ampère.}$$

$J_M = J_{\max} \cdot K$ und K muß im vorliegenden Falle zu 0,67 angenommen werden, demnach ist: $J_M = 1,25 \cdot 0,67 = 0,83$ Ampère.

Der Energieverlust im Eisen ist bekanntlich (vergl. Kap. 9, 1., S. 119):

$$\mathfrak{B} = v (\sim \eta \mathfrak{B}_{\max}^{1,6} + \sim^2 \cdot \mathfrak{B}_{\max}^2 \cdot 1,5 \cdot \delta^2 \cdot 10^{-6}).$$

Nehmen wir nun $\eta = 0,002$ an und beträgt die Blechdicke $\delta = 0,5$ mm, so ist:

$$\mathfrak{B} = 5793 \cdot (50 \cdot 0,002 \cdot 6480^{1,6} + 50^2 \cdot 6480^2 \cdot 1,5 \cdot 0,5^2 \cdot 10^{-6}) = 955\,000\,000 \text{ Erg} = 95,5 \text{ Watt.}$$

Daraus findet man:

$$J_H = \frac{\mathfrak{B}}{E_p} = \frac{95,5}{110} = 0,87 \text{ Ampère.}$$

Der Leerlaufstrom J_0 ist nunmehr:

$$J_0 = \sqrt{J_H^2 + J_M^2} = \sqrt{0,87^2 + 0,83^2} = 1,20 \text{ Ampère.}$$

Eine Messung an diesem Transformator ergab $\mathfrak{B} = 79$ Watt und $J_0 = 0,97$ Amp., was als eine befriedigende Übereinstimmung zwischen Rechnung und Versuch angesehen werden kann.

Diese Formel 52) gilt, wenn die Kraftlinien ununterbrochen nur im Eisen verlaufen, also keine Stoßfugen vorhanden sind. Sind Stoßfugen im Eisenkern vorhanden oder ist überhaupt ein Luftzwischenraum von der Länge δ von den Kraftlinien zu durchlaufen, so nimmt, da μ für Luft bekanntlich = 1 ist, der Ausdruck für J_M die Form an:

$$J_M = \frac{\mathfrak{B}_{\max}}{n_p \cdot 1,78} \left(\frac{\lambda}{\mu} + \delta \right) \dots \dots \dots 53)$$

Da die von den Stoßfugen herrührende Größe δ im Vergleiche zu $\frac{\lambda}{\mu}$ stets sehr groß ist, ¹⁾ folgt daraus, daß man bei Transformatoren, die einen geringen Magnetisierungsstrom haben sollen, Stoßfugen tunlichst vermeiden und den Kraftlinienweg λ im Eisen möglichst klein machen muß.

¹⁾ μ ist in Transformatoren etwa von der Größe 2000.

16. Kapitel.

Das Entwerfen von Transformatoren.

1. Einrichtung der Transformatoren im allgemeinen.

Die in der Praxis verwendeten Transformatoren zerfallen in zwei Hauptgruppen: erstens die Kerntransformatoren, bei denen ein eiserner Kern ganz oder teilweise von den Kupferwickelungen umgeben ist, und zweitens die Manteltransformatoren, bei denen die Wickelung zum größeren Teile von dem Eisen umgeben wird.

Als Beispiel der Kerntransformatoren mag Fig. 222 dienen. Um einen aus dünnen Eisenblechen gebildeten Rahmen J sind die primären und sekundären Spulen CC entweder, wie hier gezeichnet, übereinander liegend oder in Abteilungen nebeneinander liegend angeordnet. Auf die äußere Gestalt des Kernes, ob quadratisch, rechteckig oder rund, und ebenso auf die Querschnittform kommt wenig an, doch ist überall die dem Kreisring am nächsten kommende Form die beste.

Drehstromtransformatoren besitzen drei Kerne, die durch gemeinschaftliche Joche verbunden sind, und diese Kerne sind entweder, wie bei derartigen Apparaten von Siemens & Halske, Schuckert usw., um je 120° gegeneinander versetzt, oder die drei Kerne sind nebeneinander angeordnet, wie bei den Drehstromtransformatoren der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft, der Maschinenfabrik Oerlikon und anderen.

Die Manteltype wird durch Fig. 223 veranschaulicht. Bei dieser stellt J den aus Eisenblechen bestehenden Eisenkörper und C die sekundäre und primäre Spule dar, die übereinander liegen.

An sich wäre es am besten, wenn man die Eisenbleche in der Form des Kernes ausstanzte und hierauf die Spulen um den fertig geformten Eisenkörper herum wickelte. Dies geschieht wohl auch bei kleinen Transformatoren. Für größere Modelle ist dieses Verfahren aber kaum an-

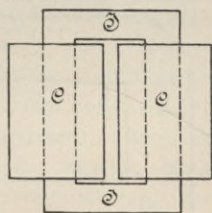


Fig. 222.
Kerntransformator.

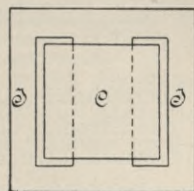


Fig. 223.
Manteltransformator.

wendbar, weil man dann die Spulen nur von Hand wickeln kann und für jede Windung den ganzen Drahtbund durch den engen Hohlraum des Eisens durchstecken muß.

Um die Spulen für sich auf der Drehbank wickeln, gut isolieren und auf ihre Isolation vor der Aufbringung prüfen zu können, muß man Unterbrechungen im Eisen zulassen. Bei den größeren Kerntransformatoren, besonders bei den Drehstromtransformatoren, läßt man daher auch Stoßfugen zu. Dann können die fertig gewickelten Spulen einfach übergeschoben werden.

Bei kleineren Transformatoren überhaupt und bei denen der Manteltype ganz besonders sucht man eigentliche Stoßfugen zu vermeiden. Man baut zu dem Zwecke den Eisenkörper in die fertig gewickelten Spulen ein. Aus Eisenblechtafeln von 0,3 bis 0,5 mm Dicke, deren eine Seite mit ganz dünnem Seidenpapier beklebt ist, stanzt man die Bleche in der gewünschten Form aus. An der schmalsten Stelle wird das Blech durchgeschnitten und

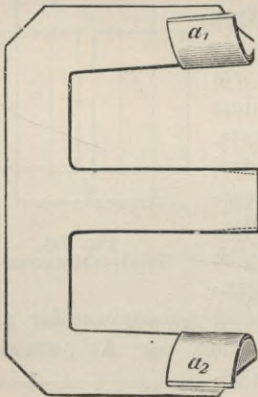


Fig. 224. Transformatorblech der Manteltype.

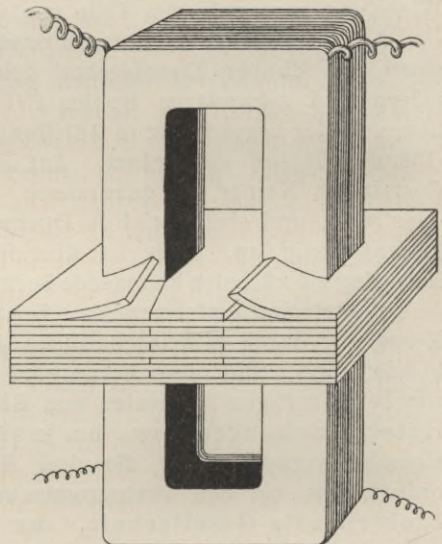


Fig. 225. Aufbau des Eisenkörpers eines Manteltransformators.

der überstehende Lappen zurückgebogen (vergl. Fig. 224), sodaß man den Streifen über die Spulen schieben kann. Dann werden die umgebogenen Streifen zurückgebogen und das Blech geglättet. Die nächste Blechtafel legt man aber nun entgegengesetzt ein, sodaß das zusammenhängende Stück die Schnittstellen a_1 a_2 des vorigen Bleches überdeckt und fährt so fort, bis der Eisenkörper fertig ist (vergl. Fig. 225). Durch den Druck einer hydraulischen Presse preßt man die Tafeln zusammen und umgibt sie hierauf mit einem isolierten Rahmen, der sie zusammenhält.

Wegen der großen Fläche, auf der sich zwei benachbarte Tafeln berühren, brauchen die Kraftlinien nicht den schmalen Luftraum der Schnittstellen a_1 a_2 zu überschreiten, sondern sie haben die Möglichkeit in den großen Berührungsflächen überzugehen. Der magnetische Widerstand des so hergestellten Eisenkörpers ist daher nur wenig größer als er sein würde, wenn die einzelnen Tafeln nicht durchgeschnitten worden wären.

Bei Kerntransformatoren kann man Stoßfugen dadurch vermeiden, daß man jede Lage aus zwei rechtwinkligen Stücken zusammensetzt und über die Stoßstelle der unteren Schicht die ununterbrochenen Teile der nächsten Schicht legt.

Sind Stoßfugen unvermeidlich, so muß man, um an denselben Wirbelströme zu vermeiden, in die Fugen noch ein dünnes Stück Isolationsmaterial (Papier) einlegen. Transformatoren mit Stoßfugen geben meist ein summendes Geräusch.

Über die Form und die Abmessung des Eisenkörpers gibt es keine bestimmten Vorschriften; doch hat sich herausgestellt, daß der Wirkungsgrad am günstigsten ausfällt, wenn für die normale Belastung die Verluste im Eisen den Verlusten im Kupfer ungefähr gleich sind.

Für Transformatoren, die behufs Speisung von Glühlampen dauernd an Beleuchtungszentralen angeschlossen werden sollen, macht man die Eisenverluste möglichst klein. Transformatoren, durch die Elektromotoren mit Strom versorgt werden sollen, werden etwas reichlicher bemessen, als der voraussichtlichen Höchstleistung entspricht, und so eingerichtet, daß der Spannungsabfall bei Belastung mit Selbstinduktion möglichst gering wird.

Den geringeren Nutzeffekt bei kleiner Belastung und den etwas höheren Preis der Transformatoren nimmt man dabei mit in Kauf.

Die Vorzüge der Kerntransformatoren sind verhältnismäßig geringes Eisengewicht und leichte Zugänglichkeit der Spulen. Ihr Nachteil sind großes Kupfergewicht und beträchtliche Länge des Kraftlinienweges.

Die Manteltransformatoren zeichnen sich aus durch die Kürze des Kraftlinienweges und geringeres Kupfergewicht, dafür wird aber das Eisengewicht größer und die Spulen sind, weil sie zum großen Teil im Eisen eingebettet sind, schwer zugänglich.

2. Gang der Berechnung eines Transformators.

Wenn ein Transformator hergestellt werden soll, ist im allgemeinen als gegeben anzusehen:

1. die Type des zu berechnenden Transformators,
2. A_s die sekundäre Nutzleistung,
3. E_p die primäre Spannung,

4. E_s die sekundäre Spannung,
5. W der Wirkungsgrad bei induktionsfreier Vollbelastung,
6. \sim die Periodenzahl des Wechselstromes,
7. c der Formfaktor der Stromkurve,
8. \mathfrak{B}_{\max} die magnetische Induktion, die man im Eisen zulassen will.

Auch die Größen η und ξ , die in der Formel für den Eisenverlust \mathfrak{B} auftreten, sind durch das verfügbare Material bestimmt.

Zunächst ist die sekundäre Stromstärke J_s :

$$J_s = \frac{A_s}{E_s} \dots \dots \dots 1)$$

die primäre Effektaufnahme:

$$A_p = \frac{A_s}{W} \dots \dots \dots 2)$$

Für eine vorläufige Rechnung wählt man Kupfer- und Eisenverluste etwa gleich groß und außerdem $J_p^2 \cdot w_p = J_s^2 \cdot w_s$.

Bei gegebener Leistung und bei gegebenem Gesamtverluste erhält man die beste Ausnutzung des Materiales, wenn der Verlust im Kupfer ungefähr 85 % bis 90 % des Verlustes im Eisen beträgt. Lichttransformatoren baut man besser mit kleineren, Krafttransformatoren mit größeren Eisenverlusten.

Da nun nach Gl. 38) des vorigen Kapitels, S. 275

$$A_p - A_s = \mathfrak{B} + J_p^2 \cdot w_p + J_s^2 \cdot w_s \dots \dots \dots 3)$$

ist, so erhält man näherungsweise:

$$\mathfrak{B} = \frac{A_p - A_s}{2} \dots \dots \dots 4)$$

Da nun: $\mathfrak{B} = v \cdot (\sim \cdot \eta \cdot \mathfrak{B}_{\max}^{1,6} + \sim^2 \cdot c^2 \cdot \xi \cdot \mathfrak{B}_{\max}^2) \dots \dots \dots 5)$ ist, so kann man, wenn man über die Größe von \mathfrak{B}_{\max} eine Annahme macht, hieraus das Eisenvolumen v berechnen.

Beachtet man, daß auf 20 bis 25 qcm Oberfläche ein Watt Verlust zugelassen werden darf und auf 1 qcm Eisenquerschnitt eine Nutzleistung von 60 bis 100 Watt, so kann man nun, unter Berücksichtigung genügender Öffnung für die Wickelungen, die Gestalt des Eisenkernes aufzeichnen. Dabei muß berücksichtigt werden, daß der wirkliche Eisenquerschnitt wegen der Papierisolation zwischen den Blechen um ungefähr $\frac{1}{9}$ des wirklichen Eisenquerschnittes zu vergrößern ist und entsprechend auch das Volumen vergrößert eingesetzt werden muß.

Aus der Formel:

$$\varepsilon_s = \frac{4,44 \cdot n_s \cdot \sim \cdot Q \cdot \mathfrak{B}_{\max}}{c} \cdot 10^{-8} \dots \dots \dots 6)$$

bestimmt man hierauf die Windungszahl n_s der sekundären Spule.

eine Energiemenge von 10000 + 400 Watt abgeben. Die Frequenz ~ soll 50 in jeder Sekunde betragen. Die Induktion im Eisen mag $\mathfrak{B}_{\max} = 5000$ sein. Es ist somit:

$$\mathfrak{B} = 200 \text{ Watt, } J^2_p \cdot w_p = 100 \text{ Watt, } J^2_s \cdot w_s = 100 \text{ Watt,}$$

$$A_s = 10000 \text{ Watt, } A_p = 10400 \text{ Watt,}$$

der Wirkungsgrad bei Vollbelastung, in Prozenten

$$W = \frac{10000}{10400} = 96\%.$$

Wir bestimmen zunächst das Volumen des Eisenkörpers aus der Formel 38) des vorigen Paragraphen:

$$v = \frac{\mathfrak{B}}{(\sim \cdot \eta \cdot \mathfrak{B}_{\max}^{1,6} + \sim^2 \cdot \xi \cdot \mathfrak{B}_{\max}^2) 10^{-7}} = \frac{5000}{(50 \cdot 0,002 \cdot 5000^{1,6} + 50^2 \cdot 2 \cdot 10^{-7} \cdot 5000^2) \cdot 10^{-7}}$$

$$v = 20970 \text{ ccm.}$$

Das Eisengewicht G_F des Transformators ist hiernach:

$$G_F = v \cdot 7,8 = 20,970 \times 7,8 = 163 \text{ kg.}$$

Der Eisenverlust für 1 ccm beträgt hiernach $\frac{200}{20910}$, rund 0,01 Watt. Dem

entspricht nach den Tabellen für $\frac{1}{3} \text{ mm}$ dicke, gute Eisenbleche (S. 118) etwa ein magnetische Induktion $\mathfrak{B}_{\max} = 5150$.

Wir nehmen nun zunächst einmal die nebenstehende Querschnittsform (Fig. 226) des Eisenkörpers an, dann ist die Oberfläche eines Bleches:

$$50^2 - 2 \cdot 36 \cdot 12 = 2500 - 864 = 1636 \text{ qcm.}$$

Die Dicke des Eisens des Transformators würde dann:

$$B = \frac{v}{1636} = \frac{20970}{1636} = 12,78 \text{ cm.}$$

Nehmen wir an, daß der Eisenkern aus $\frac{1}{3} \text{ mm}$ dicken Blechen zu-

sammengestellt wird, so erhalten wir:

$$\frac{127,8}{\frac{1}{3}} = 383 \text{ Bleche.}$$

Für die Isolation der Bleche durch Seidenpapier rechnen wir 15% zur Dicke hinzu, sodaß wir erhalten:

$$12,78 \cdot 1,15 = 14,7 \text{ cm, rund } 15 \text{ cm.}$$

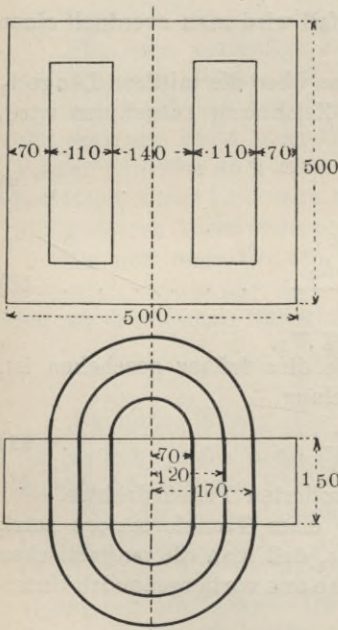


Fig. 226. Erste Skizze eines Manteltransformators.

Der bewickelte, wahre Eisenquerschnitt Q beträgt hiernach:

$$Q = 12,78 \times 14 = 178,9 \text{ qcm.}$$

Dies ergibt den gesamten Kraftlinienstrom:

$$\Phi_{\max} = 178,9 \times 5150 = 921300.$$

Daraus findet man nach der Formel für die effektive EMK in der sekundären Wickelung

$$E_s = \frac{2\pi}{\gamma^2} \sim \cdot n_s \cdot \Phi \cdot 10^{-8}$$

die Zahl der sekundären Windungen

$$n_s = \frac{E_s \cdot 10^8}{4,44 \cdot \sim \cdot \Phi} = \frac{1,02 \cdot 100 \cdot 10^8}{4,44 \cdot 50 \cdot 921300} = 49,9,$$

näherungsweise 50 Windungen.

Da infolge des Spannungsabfalles das Umsetzungsverhältnis die Neigung hat, um etwa 2% abzunehmen (vergl. die Tabelle S. 264), so muß man für E_s nicht 100, sondern $1,02 \times 100 = 102$ einsetzen.

Die Zahl der primären Windungen ist im Umsetzungsverhältnis $\frac{n_p}{n_s} = 20$ mal größer, beträgt demnach $n_p = 1000$ Windungen.

Man kann nunmehr auch angenähert die primäre und sekundäre Stromstärke bestimmen. Die primäre Stromstärke, abgesehen vom Leerlaufstrom, wird bei Vollbelastung

$$J_p = \frac{A_p}{E_p} = \frac{10000 + 400}{2000} = 5,2 \text{ Ampère.}$$

Die sekundäre Stromstärke wird in erster Annäherung

$$J_s = \frac{A_s}{E_s} = \frac{10000}{100} = 100 \text{ Ampère sein.}$$

Aus den festgesetzten Verlusten im Kupfer läßt sich der Widerstand der Wickelungen angenähert ermitteln:

$$J_p^2 \cdot w_p = 100 \text{ Watt, } w_p = \frac{100}{J_p^2} = \frac{100}{27,0} = 3,7 \omega$$

$$J_s^2 \cdot w_s = 100 \text{ Watt, } w_s = \frac{100}{J_s^2} = \frac{100}{10000} = 0,01 \omega.$$

Damit die dickeren Drähte der sekundären Wickelung nicht so stark gebogen werden müssen, und weil diese Drähte eine ungefährliche niedrige Spannung führen, nimmt man die sekundäre Spule außen und die primäre innen.

Man entnimmt nun der Skizze einen Näherungswert für die mittlere Länge einer Windung der Primärspule, indem man voraussetzt, daß die Spulen ungefähr gleich dick ausfallen und durch Isolationschichten von 10 mm Dicke voneinander und durch Isolationschichten (Luftraum eingerechnet) von 10 mm von dem Eisenkörper getrennt sind.

Da wir den Hohlraum im Eisen $36 \times 12 \text{ cm}$ gewählt haben, bleibt eine Höhe von $36 - 2 \cdot 1,0 = 34 \text{ cm}$ und eine Breite von

$$12 - 2 \cdot 1,0 - 1,0 = 9,0 \text{ cm}$$

für die Wickelungen übrig.

Aus der nebenstehenden Skizze ergibt sich dann der mittlere Radius der primären Wickelung in der halbkreisförmigen Umbiegung der Drähte zu 10 cm , der mittlere Radius der primären Wickelung zu 15 cm und damit:

die mittlere Länge einer prim. Windung $= 2 \cdot 10 \cdot \pi + 2 \cdot 15 = 92,8 \text{ cm}$,

die mittlere Länge einer sek. Windung $= 2 \cdot 15 \cdot \pi + 2 \cdot 15 = 124 \text{ cm}$.

Nimmt man die mittlere Länge einer primären Windung zu $92,8$ an, so findet man den Querschnitt des Drahtes aus der Formel:¹⁾

$$w_p = \frac{k \cdot l}{q} \quad \text{oder} \quad q = \frac{k \cdot l}{w_p} = \frac{0,02 \cdot 0,928 \cdot 1000}{3,7} = 5,02 \text{ qmm.}$$

Daraus ergibt sich die Drahtdicke $d_p = 2,6 \text{ mm}$ und besponnen $d_p' = 3,2 \text{ mm}$.

Die Höhe eines der Eisenfenster betrug 360 mm ; rechnet man für die Isolation und sonstige Zwischenräume zweimal 10 mm ab, so bleiben 340 mm . Dann kommen in eine Lage $340/3,2 = 107$ Windungen und es sind $1000 : 107 = 10$ Lagen nötig. 10 Lagen ergeben eine Dicke der primären Wickelung von $10 \times 3,2 = 32 \text{ mm}$. Nimmt man auch innen in der Spule für Isolation und Spielraum 10 mm , so ist die Weite der innersten Wickelung $140 + 10 + 3,2 = 153,2$.

Der äußere Durchmesser der Spule wird: $153,2 + 2 \times 32 - 3,2 = 214 \text{ mm}$. Der mittlere Durchmesser würde somit $\frac{214 + 153}{2} = 183 \text{ mm}$, statt wie angenommen 200 mm .

Wir wiederholen jetzt die Rechnung für die mittlere Weite einer Windung von 183 mm . Dann wäre die mittlere Länge einer primären Windung $= \pi \cdot 18,3 + 2 \cdot 15 \text{ cm} = 57,5 + 30 = 87,5 \text{ cm}$. Die Drahtlänge für die primäre Wickelung wird dadurch $0,875 \times 1000 = 875 \text{ m}$.

Wir erhielten für q

$$q = \frac{0,02 \times 875}{3,7} = 4,73 \text{ qmm.}$$

Daraus ergibt sich $d_p = 2,45 \text{ mm}$ und die Dicke des über-sponnenen Drahtes zu $3,2 \text{ mm}$.

Das ergibt auf 340 mm Höhe des Fensters $340 : 3,2 = 104$ Windungen und $1000 : 104 = 10$ Lagen, wobei auf die zehnte Lage nur 64 Windungen kommen.

¹⁾ Für das spezifische Leitungsvermögen k der erwähnten Kupferdrähte ist hier die Zahl $0,02$ benutzt.

Nunmehr ist die Weite der innersten quadratischen Windung

$$140 + 10 + 3 = 153$$

und die der äußersten $153 + 2 \times 36 - 3 = 222$,

die der mittleren somit 188 mm ; das aber ist eine befriedigende Übereinstimmung. Die Beanspruchung des Kupfers wird ungefähr $5,2 : 4,73 = 1,1 \text{ Ampère}$ für 1 qmm .

Die primäre Wickelung wird somit mit Draht von $2,4 \text{ mm}$ ausgeführt; es werden rund 875 m Draht dazu nötig sein. Die Dicke der sekundären Spule würde $3,45 \text{ cm}$ betragen.

Nimmt man für die Dicke der äußeren Isolation beiderseitig 5 mm , so wird die äußere Dicke der primären Spule:

$$140 + 10 + 10 + 2 \times 35 = 230 \text{ mm}.$$

Nunmehr bestimmen wir die Abmessungen der sekundären Spule. Wir denken uns dieselbe außen um die Primärspule herum gelegt, weil sich der dicke Draht in weitere Windungen besser wickeln läßt, und bei dieser Anordnung die Drähte, die hohe Spannung führen, in der Hauptsache durch den Eisenkörper und die andere Spule verdeckt werden, und weil endlich bei dieser Art der Anordnung die magnetische Streuung so gering wird, daß man durch deren Vernachlässigung keinen erheblichen Fehler begeht. Rechnen wir nun für besondere Isolation der sekundären Spule, Spielraum usw. nochmals beiderseitig 5 mm , so wird die innere Weite der innersten Windung der Sekundärspule 240 mm . Bei der gleichen Beanspruchung des Kupfers mit $1,1 \text{ Ampère}$ für 1 qmm würde der Querschnitt des Sekundärdrachtes $100 : 1,1 = 91 \text{ qmm}$, das gäbe einen Draht von $10,8 \text{ mm}$ Dicke. Statt dessen verwenden wir 6fach parallel geschalteten Draht von $4,4 \text{ mm}$, dessen Kupferquerschnitt $6 \times 15,2 = 91,2 \text{ qmm}$ ist. Dieser Draht ist mit der Isolation $5,1 \text{ mm}$ dick. Die verfügbare Höhe des Fensters im Eisenkörper, Isolation abgerechnet, betrug 340 mm , demnach enthält eine Lage $340 : (5,1 \times 6) = 340/30,6 = 11$ Windungen 6fach parallelen Drahtes.

Da es 50 sekundäre Windungen geben soll, macht das 5 Lagen von $5,1 \text{ mm}$ dickem Draht. Demnach wird die sekundäre Spule ungefähr eine Dicke von $5 \times 5,1 = 25,5 \text{ mm}$ haben.

Die innerste Windung hätte eine Weite von $240 + 5,1 = 245$, die äußerste Windung hätte eine Weite von $240 + 2 \times 25,5 - 5,1 = 286 \text{ mm}$. Darnach wird die mittlere Länge einer sekundären Windung

$$\frac{24,5 + 28,6}{2} \cdot \pi + 2 \cdot 15 = 113 \text{ cm}.$$

Die Länge der sekundären Wickelung wäre darnach $1,118 \times 63 \text{ m}$. Der Querschnitt der sekundären Bewickelung würde dann:

$$q_s = \frac{0,02 \times 1,11 \times 63}{0,01} = 140 \text{ qmm}.$$

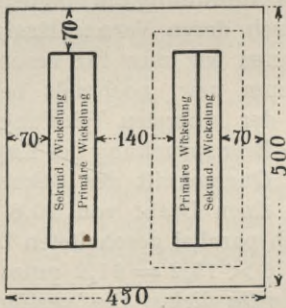
Dies gäbe bei 6fach parallelem Draht für den Querschnitt eines Drahtes $23,3 \text{ qmm}$, dessen Dicke $5,45 \text{ mm}$ nackt und $6,1 \text{ mm}$ besponnen ist. Von solchem 6fach parallelem Drahte gehen in das Fenster des Eisenkörpers $340/36 = 9$ nebeneinander. Dies gibt für 50 Windungen 6 Lagen von einer Dicke von $36,6 \text{ mm}$.

Darnach würde die Weite der innersten Windung $240 + 6,1 = 246$ und die Weite der äußersten Windung $240 + 2 \times 36 - 6 = 306$ und darnach die mittlere Weite einer sekundären Windung 266 mm .

Die Übereinstimmung ist so befriedigend, daß wir mit $26,6 \times \pi + 2 \cdot 15 = 113,6 \text{ cm}$ die mittlere Länge einer sekundären Windung und mit $1,136 \times 50 = 56,8 \text{ m}$ die Länge der sekundären Wickelung annehmen können.

Die äußere Weite der sekundären Windung betrüge somit ungefähr 306 mm und mit Rücksicht auf die Isolation 310 mm . Wir tragen nunmehr in die Zeichnung die Spulen ein.

Es zeigt sich, daß die Fenster des Eisenkörpers nicht ganz durch die Wickelungen ausgefüllt werden würden. Die äußere Spule ist



mit Isolation 310 mm dick, die Außen-seiten der Fenster aber stehen 360 mm auseinander. Man kann somit auf jeder Seite $2,5 \text{ cm}$ vom Eisen weglassen. Man verkürzt deshalb die Fenster so, daß die Wickelung mit reichlicher Isolation gerade bequem darin Platz finden kann, aber den Hohlraum völlig ausfüllt (vergl. Fig. 227). Dann fallen 4 Eisenstücke weg mit einem Volumen von $4 \times 2,5 \times 7,0 \times 13,8 = 900 \text{ cc}$.

Das Eisengewicht wird dadurch um $0,90 \times 8 = 7,2 \text{ kg}$ vermindert und beträgt nur noch 156 kg . Der Watt-

Fig. 227. Abgeänderte Skizze des berechneten Manteltransformators.

verlust im Eisen wird dadurch im Verhältnis von $163 : 156 = 200 : 192$, auf 192 Watt erniedrigt.

Um nunmehr den Leerlaufstrom zu finden, bestimmen wir zunächst den wattlosen Magnetisierungsstrom.

$$J_{M \max} = \frac{\mathfrak{H}_{\max} \cdot l}{1,25 n_p} = \frac{2,1 \cdot 117}{1,25 \cdot 1000} = 0,20 \text{ Ampère.}$$

Dann ist $J_M = J_{M \max} \cdot 0,66 = 0,13 \text{ Ampère}$.

Den Wert für die Permeabilität μ , aus dem wir nach Formel 9, S. 103, \mathfrak{H}_{\max} berechnen können, haben wir dabei dem Diagramm, Fig. 72, S. 108, entnommen.

Die Wattkomponente des Leerlaufstromes bestimmen wir aus dem Verluste im Eisen durch Hysteresis und Wirbelstrom (192 Watt) und der primären Klemmenspannung (2000)

$$i_H = \frac{192}{2000} = 0,096 \text{ Ampère.}$$

Der Leerlaufstrom i_o selbst setzt sich aus diesen beiden Komponenten zusammen, die einen Winkel von 90° miteinander einschließen, und man findet:

$$i_o = \sqrt{i_M^2 + i_H^2} = \sqrt{0,13^2 + 0,10^2} = 0,17 \text{ Ampère.}$$

Der Leerlaufstrom ist somit vom Primärstrom $J_p = 5,4$ bei Vollbelastung

$$\frac{0,17}{5,4} \times 100 = 3\%.$$

Wir berechnen nun Spannungsverlust und Wirkungsgrad bei Vollbelastung und bei halber Belastung.

Bei Vollbelastung ist der primäre Strom gleich Gesamteffekt durch Klemmenspannung, also

$$J = \frac{10000 + 192 + 100 + 100}{2000} = \frac{10392}{2000} = 5,20 \text{ Ampère}$$

und unter Hinzufügung des Leerlaufstromes

$$J = 5,4 \text{ Ampère.}$$

Der Widerstand n_p der primären Wicklung, bestehend aus 875 *m* Draht von 2,45 *mm*, beträgt (den spezifischen Leitungswiderstand des ungefähr 65° warmen Kupfers zu 0,02 angenommen).

$$w_p = \frac{0,02 \cdot 875}{4,71} = 3,71 \omega.$$

Dann ist der Spannungsverlust in der primären Leitung $3,71 \cdot 5,4 = 20,1$ Volt, der Effektverlust $v_p = 3,71 \cdot 5,4^2 = 108$ Watt. Der Widerstand w_s der sekundären Wicklung, bestehend aus 57 *m* von 6fach parallelem Drahte von 5,45 *mm* Dicke ist:

$$w_s = \frac{0,02 \cdot 57}{6 \cdot 23,3} = 0,01 \omega.$$

Der sekundäre Strom J_s bei Vollbelastung war angenähert 100 Ampère, der Spannungsabfall somit 1 Volt und der Effektverlust 100 Watt.

Der reduzierte Spannungsabfall in der primären Spule ist $20,1 \cdot \frac{50}{1000} = 1,00$ Volt, der Gesamtspannungsverlust somit $1,0 + 1,0 = 2,0$ Volt. Die sekundäre Klemmenspannung bei Vollbelastung ohne Selbstinduktion ist somit (vergl. S. 291):

$$102,0 - 2,0 = 100,0 \text{ Volt.}$$

Der Wirkungsgrad W in Prozenten ist:

$$W = 100 \cdot \frac{10000}{10400} = 96,0\%.$$

Das Kupfergewicht der Bewickelung in *kg* ist: $G = l \cdot q \cdot s$, wenn *l* in *dem*, *q* in *qdem* ausgedrückt und das spezifische Gewicht $s = 8,95$ angenommen wird:

Für die primäre Spule ist $G = 36,8 \text{ kg}$ } Gesamtkupfergewicht
 Für die sekundäre Spule ist $G = 71,2 \text{ kg}$ } 108 *kg*.

Das Eisengewicht war 156 *kg*, das Gewicht des aktiven Materials für 1 Kilowatt beträgt somit rund 36 *kg*, was nach den praktischen Erfahrungen für Transformatoren dieser Art durchaus angemessen erscheint.

Nehmen wir den Preis von 1 *kg* Kupfer in der hier verwendeten Form zu 1,75 *M* an und den des besonders weichen Eisenblechs von $\frac{1}{3}$ *mm* Dicke zu 0,75 *M*, so betragen die Materialkosten des Transformators:

$$\begin{aligned} 108 \times 1,75 &= 189 \text{ } M \\ 156 \times 0,75 &= 117 \text{ } \gg \end{aligned}$$

zusammen: 306 *M*.

Als ausstrahlende Oberflächen können wir bei einem Manteltransformator nur die obere Fläche und die nicht von der Wickelung bedeckte Eisenfläche der Seitenflächen in Anrechnung bringen.

Die rechten und linken Seitenflächen sind Rechtecke von der Breite 15 *cm* und der Höhe 50 *cm*, ihr Inhalt also ist 750 *qcm*. Die Deckfläche ist ein Rechteck mit den Seiten 15 und 45 *cm*. Die von der Wickelung nicht bedeckten Vorder- und Hinterflächen sind vier Rechtecke, deren jedes $50 \times 7 = 350 \text{ } qcm$, und vier Rechtecke von 7 *cm* Höhe und 31 *cm* Seite, $7 \times 31 = 217 \text{ } qcm$.

Die Gesamtoberfläche ist somit:

$$2 \cdot 750 + 2 \cdot 675 + 4 \times 350 + 4 \times 217 = 5120 \text{ } qcm.$$

Dies gibt ungefähr 26 *qcm* Eisenoberfläche für 1 Watt Kernverlust und das ist erfahrungsmäßig ein zulässiger Betrag. Bei Dauerbetrieb mit Vollbelastung wird sich der Transformator, wenn er in einen durchlöcherten Eisenkasten eingeschlossen wird, nach Versuchen, die Kapp¹⁾ angestellt hat, um ungefähr 60° C. über die Umgebung erwärmen.

4. Vorausberechnung eines Kerntransformators.

Sehr häufig sind die Abmessungen des Eisenkörpers von Transformatoren gleicher Sekundärleistung A_s her bekannt. Dann gestaltet sich der Gang der Rechnung wesentlich einfacher, wie dies nachfolgendes Beispiel zeigen mag.

Für eine primäre Betriebsspannung von 2000 Volt und eine sekundäre Spannung von 100 Volt soll ein Transformator für 110 Ampère sekundäre Stromstärke, also von einer Gesamtleistung von 11 Kilowatt konstruiert werden. Periodenzahl $\sim = 50$. Das Eisengestell

¹⁾ Kapp, Transformatoren, S. 43.

soll als gegeben vorausgesetzt werden und nebenstehende Form haben. (Vergl. Fig. 228.) Die Kerne sind von quadratischem Querschnitte, Quadratseite = 12,5 cm, die Ecken der Quadrate sind um 20 mm abgeschrägt, damit die Spulen näher an den Kernen liegen. Dann beträgt der Querschnitt: $12,5^2 - 2 \cdot 2^2 = 148 \text{ qcm}$. Rechnet man davon 12% ab für die Isolation zwischen den Eisenblechen, so ist der wirkliche Eisenquerschnitt rund 130 qcm.

Nimmt man die magnetische Induktion $\mathfrak{B}_{\max} = 5060$ für 1 qcm an, so führt der Kraftlinienstrom $\Phi_{\max} = 130 \cdot 5060 = 658000$ Kraftlinien.

Die Zahl der sekundären Windungen bestimmt man aus:

$$E_s = 4,44 \cdot \sim \cdot \Phi \cdot 10^{-8} \cdot n_s \quad n_s = \frac{E_s}{4,44 \cdot \sim \cdot \Phi \cdot 10^{-8}}$$

Nimmt man den Spannungsabfall bei Vollbelastung zu 2,5 an, so ist $E_s = 102,5$ Volt und

$$n_s = \frac{102,5}{4,44 \cdot 50 \cdot 658000 \cdot 10^{-8}} = 70.$$

Die primäre Wickelung würde aus

$$n_p = 70 \cdot \frac{2000}{102,5} = 1366$$

Windungen bestehen.

Jeder der beiden Kerne bekommt somit 683 primäre und 35 sekundäre Windungen.

Die Dicke des zu verwendenden Drahtes ergibt sich daraus, daß der Verlust durch Stromwärme im ganzen 174 Watt, für jede Wickelung also ungefähr 87 Watt betragen soll.

Die sekundäre Stromstärke beträgt $i_s = 110$ Ampère. Daraus findet man den Widerstand der sekundären Wickelung $w_s = 0,0068$ Ohm.

Den Widerstand der primären Wickelung findet man aus der primären Stromstärke $i_p = 5,7$ Ampère und dem Verluste durch Stromwärme zu $w_p = 2,8$ Ohm.

Rechnet man für Isolation oben und unten und den Spielraum zusammen 35 mm ab, so ergibt sich die vertikale Höhe der Wickelung zu $45,0 - 3,5 = 41,5$ cm.

Den Durchmesser der innersten Wicklung nehmen wir mit Rücksicht auf Spielraum und eine Isolation von mindestens 5 mm Dicke zu 17,0 cm.

Damit etwas Spielraum zwischen den beiden äußeren Spulen bleibt, wählen wir den Durchmesser der äußeren Spule zu 26,4 mm.

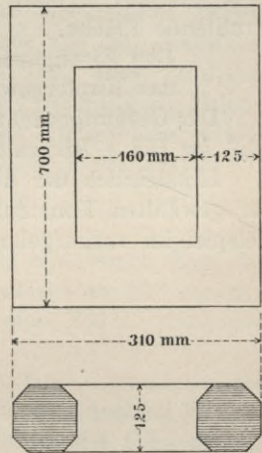


Fig. 228. Eisengestell eines Kerntransformators.

Es bleibt dann $\frac{26,4 - 17,0}{2} = 4,7 \text{ cm}$ für beide Spulen. Davon

gehen noch 5 *mm* für Isolation und 4 *mm* für Spielraum zwischen beiden Spulen ab, man hat somit 3,8 *cm* verfügbar für die Wickelung.

Dies gibt dann folgende Wickelungen: Sekundäre Spule (innen) 2 Lagen (eine zu 18, eine zu 17 Windungen) bestehend aus $6 \times 20 \text{ mm}$ rechteckigem Draht (besponnen auf 7×21); primäre Spule (außen) 6 Lagen zu 112 und eine zu 10 Windungen bestehend aus Draht von 3,1 *mm* Dicke ($3\frac{2}{3} \text{ mm}$ besponnen).

Die sekundäre Wickelung wird rund 14, die primäre 24 *mm* tief.

Der Verlust durch Hysteresis wird, vorzügliches Blech vorausgesetzt, 163 Watt betragen.

Der Wirkungsgrad bei Vollbelastung ergibt sich zu 97 %.

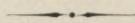
Die abkühlende Oberfläche wird annähernd gleich 12000 *qcm*. Dies gibt für 1 Watt in Wärme umgesetzte Energie 36 *qcm* ausstrahlende Fläche.

Das Eisengewicht beträgt 180 *kg*

das Kupfergewicht beträgt 112 *kg*.

Das Gesamtgewicht des wirksamen Materiales beträgt 292 *kg* oder 26,6 *kg* für 1 Kilowatt.

Hinsichtlich der übrigen Ermittlungen, die für die Beurteilung der gewählten Konstruktion von Wert sind, verweisen wir auf das Beispiel im vorhergehenden Abschnitt.



17. Kapitel.

Arbeitsverhältnisse der Transformatoren.

1. Die Arbeitsdiagramme eines idealen Transformators.

a) Es ist keine Streuung vorhanden.

Wir betrachten zunächst einen idealen Transformator, in dem kein Verlust irgend welcher Art und keine magnetische Streuung vorhanden wären; seine Belastung möge zunächst völlig induktionsfrei sein (z. B. Glühlampen).

Die sekundäre Spannung und die sekundäre Stromstärke zeigen dann keine Phasendifferenz. Wir gehen dann aus von den effektiven Ampèrewindungen A_w des sekundären Stromkreises. Diese sind mit dem sekundären Strome J_s und der sekundären Spannung E_s gleichgerichtete Vektoren. Damit E_s erzeugt wird, ist ein gewisser Kraftlinienfluß Φ_s nötig von der Größe (vergl. Kap. 2, 2, S. 29):

$$\Phi_{\max} = \frac{E_s \cdot \sqrt{2}}{2 \pi \cdot \sim \cdot n_s} \cdot 10^8 \quad \dots \quad 1)$$

Der Vektor $O\Phi$, der dieses Feld darstellt, eilt (vergl. Kap. 2, 1, S. 21) der sekundären Spannung und Stromstärke um 90° voraus.

In der Primärspule erzeugt dieses Feld eine EMK, die dem Felde um 90° nachhinkt, ihre Größe ist:

$$E_p = 4,44 \cdot \Phi \cdot \sim \cdot n_p \cdot 10^{-8} \quad \dots \quad 2)$$

Um dieser das Gleichgewicht zu halten, muß der primären Wickelung eine gleichgroße, entgegengesetzt gerichtete EMK $O E_p = E_p$ von der Elektrizitätsquelle aufgedrückt werden.

Damit das Magnetfeld Φ zustande kommt, muß eine magnetomotorische Kraft, eine Anzahl von Ampèrewindungen, vorhanden sein, die durch die Gleichung

$$\Phi_{\text{eff}} = \frac{\chi}{w} = \frac{n J}{0,8 \cdot \lambda \cdot 10^6}, \quad \Phi_{\max} = \frac{\chi \sqrt{2}}{w} \quad \dots \quad 3)$$

definiert wird. Hierin ist Q der Querschnitt, λ die mittlere Länge des Kraftlinienweges, μ die Permeabilität.

Wir machen (Fig. 229) $OA = \chi$.

Diese resultierende Ampèrewindungszahl muß die Resultante aus χ_p und χ_s sein. Wir vervollständigen daher das Parallelogramm

OCAD, so ist $OD = \chi_p$ die Ampèrewindungszahl der primären Wickelung.

Nun ist $OC = n_s \cdot J_s$ und $OD = n_p \cdot J_p$, man kann somit aus OC und OD die sekundäre und primäre Stromstärke nach Größe und Phase bestimmen.

Da OA nicht null sein kann, weil ja magnetischer Widerstand vorhanden ist, so fallen OD und OE_p nicht zusammen; obgleich also

in der sekundären Wickelung Strom und Spannung in gleicher Phase sind, ist dies für die primäre Wickelung nicht der Fall, sie besitzen die Phasendifferenz $E_p OD = \varphi_p$.

Nimmt die Belastung ab, so wird OC kleiner und D rückt näher an A heran, φ_p nimmt dadurch zu.

Bei Leerlauf wird $CO = \text{null}$, weil $i_s = 0$ wird, φ wird gleich 90° , weil D mit A zusammenfällt. OA ist dann die Ampèrewindungszahl des Leerlaufstromes.

Enthält die Belastung, die an die Sekundärspule angeschlossen

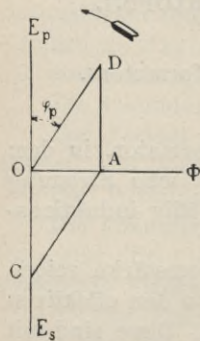


Fig. 229. Arbeitsdiagramm eines streuungslosen Transformators bei induktionsfreier Belastung.

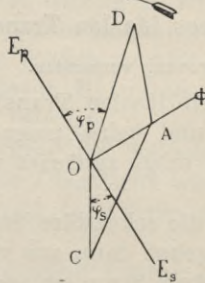


Fig. 230. Arbeitsdiagramm eines Transformators ohne Streuung mit induktiver Belastung.

ist, Selbstinduktion, so ist Strom J_s und Spannung E_s nicht mehr phasengleich, sondern der sekundäre Strom hinkt der sekundären Spannung um den Winkel $E_s OC$ nach. OA ist wieder senkrecht auf der Geraden $E_s OE_p$ (Fig. 230), das Parallelogramm OCAD ist wesentlich spitzwinkliger und $\varphi_p = DOE_p$, der Winkel, um den die primäre Spannung der primären Stromstärke vorausgeht, ist wesentlich vergrößert in Vergleich zu dem vorigen Falle, in dem die Belastung induktionsfrei war.

b) Der Transformator besitzt magnetische Streuung.

Wenn Streuung vorhanden ist, tritt in jeder Wickelung eine der Zahl der Ampèrewindungen proportionale EMK der Selbstinduktion E_s^1) auf, die auf dem Stromvektor OJ senkrecht steht und dem Strom um 90° nachhinkt. Um diese EMK zu überwinden, muß eine gleich große entgegengesetzt gerichtete, also dem Strome um 90° voreilende EMK vorhanden sein.

Es sei wieder OC (Fig. 231) die sekundäre Ampèrewindungszahl, in Phase mit dem Stromvektor OJ, und OE_s^K die sekundäre Klemmen-

¹⁾ Man beachte in Text und Figur den Unterschied zwischen E_s (Selbstinduktion) und E_s (sekundäre und induzierte Spannung).

spannung. Das durch die sekundäre Ampèrewindungszahl OC verursachte Streufeld erzeugt eine um 90° vorauseilende EMK der Selbstinduktion OE_s . Damit aber E_s^K wirklich zustande kommt, muß eine größere EMK E_s in der sekundären Wicklung induziert werden, deren Größe und Phase wir finden, wenn wir das Parallelogramm $OE_s E_s^K E_s$ vervollständigen.

Dieses Diagramm ist in mehrfacher Beziehung lehrreich. Der Unterschied zwischen E_s und E_s^K ist der Spannungsabfall überhaupt, E_s nennt man den induktiven Spannungsabfall.

Man erkennt, daß der induktive Spannungsabfall einen um so größeren Unterschied zwischen E_s und E_s^K zur Folge hat, je größer der Phasenunterschied φ_s zwischen sekundärem Strom und Spannung, je größer also die Selbstinduktion der Belastung ist.

Die Streuung wächst ferner proportional der sekundären Stromstärke, demnach wird E_s um so größer und der Spannungsabfall $E_s - E_s^K$ um so größer, je größer i_s wird.

c) Die Ermittlung des induktiven Spannungsabfalles.

Kapp hat für den induktiven Spannungsabfall Formeln abgeleitet und deren Koeffizienten aus Versuchen ermittelt.¹⁾

Es müssen dabei zwei Fälle unterschieden werden; einmal ob die Spulen lange Zylinder sind, die konzentrisch übereinander liegen, oder ob die Spulen Scheiben bilden, die nebeneinander angeordnet sind.

Für jede Spule wird der induktive Spannungsabfall E'_s einzeln berechnet und zwar in Prozenten nach der Formel:

$$100 \cdot \frac{E'_s}{E} = K \cdot \frac{Aw}{\Phi} \left(b + \frac{a}{3} \right) \frac{p}{l} \dots 4)$$

Dabei ist für Zwischenspulen $K = 0,00005$, für Endspulen $K = 0,00015$, Aw ist die Zahl der Ampèrewindungen der Spule, Φ die Kraftlinienzahl des von beiden Spulen umfaßten Nutzfeldes. a ist bei zylindrischen Spulen die Wicklungstiefe; bei Scheibenspulen ist a die Scheibendicke. b ist in beiden Fällen der Abstand zweier benachbarter Spulen von Kupfer zu Kupfer gerechnet. Mit p ist der Umfang des Streuraumes b und mit l die Länge der Zylinderspulen oder die radiale Tiefe bei Scheibenspulen (vergl. Fig. 232a und b) bezeichnet.

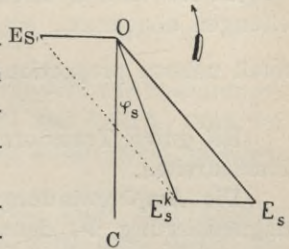


Fig. 231. Wirkung des induktiven Spannungsabfalles durch Streuung.

¹⁾ ETZ 1898, S. 244. Wir verweisen wegen der Ableitung dieser Formeln auf die Originalarbeit. Man vergl. auch Kapp, Transformatoren 2. Aufl. 1900, Berlin, Springer, S. 111.

Die Summe aus den Spannungsabfällen E'_s sämtlicher einzelner Spulen ergibt den gesamten induktiven Spannungsabfall E_s .

Durch weitergehende Unterteilung der Spulen und Wechsel zwischen Primärspulen P und Sekundärspulen S (vergl. Fig. 209, S. 269) kann man den induktiven Spannungsabfall beliebig herabdrücken.

Da A_w und a direkt proportional der Anzahl u der Unterteilungen abnehmen, so vermindert sich der induktive Spannungsabfall nahezu proportional mit $\frac{1}{u^2}$.

Bei guten Transformatoren soll $\frac{100 \cdot E_s}{E}$ drei Prozent nicht überschreiten.

Die Ampèrewindungszahl A_w ist umgekehrt proportional der Magnetisierung Φ , denn wählt man eine stärkere Magnetisierung

$\Phi = Q \cdot \mathfrak{B}$ für das Eisen, so entspricht derselben Leistung eine geringere Windungszahl. Der Spannungsabfall durch Streuung wird daher nahezu umgekehrt proportional dem Quadrate des Magnetismus abnehmen.

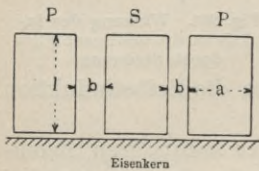


Fig. 232 a.
Scheibenspulen.

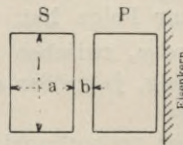


Fig. 232 b.
Zylinderspulen.

Starke Magnetisierung verursacht aber größere Hysteresisverluste und schlechten Wirkungsgrad, letzteren zumal bei geringer Belastung. Bei Transformatoren, deren Spannungsverlust gering sein soll, wird man daher mit hoher Magnetisierung arbeiten und sie abschalten vom Netz, wenn sie nicht belastet sind. Bei dauernd an das Netz angeschlossenen Transformatoren wird man dagegen sich Streuungsverluste gefallen lassen und mit niedriger Magnetisierung arbeiten.

Zum Schlusse mag noch auf den Einfluß der Periodenzahl \sim auf den induktiven Spannungsabfall hingewiesen werden.

Derselbe Transformator mag einmal mit \sim_1 , das andere Mal mit einer größeren Periodenzahl \sim_2 betrieben werden. Die Erwärmung durch Hysteresis \mathfrak{B}_H soll in beiden Fällen gleich sein.

$$\text{Nun ist:} \quad \mathfrak{B}_H = V \cdot \sim \cdot \eta \cdot \mathfrak{B}_{\max}^{1,6}$$

$$\text{folglich:} \quad V \cdot \sim_1 \cdot \eta \cdot \mathfrak{B}_1^{1,6} = V \cdot \sim_2 \cdot \eta \cdot \mathfrak{B}_2^{1,6}$$

$$\text{oder:} \quad \frac{\mathfrak{B}_1^{1,6}}{\mathfrak{B}_2^{1,6}} = \frac{\sim_2}{\sim_1}$$

$$\text{folglich:} \quad \frac{\mathfrak{B}_1}{\mathfrak{B}_2} = \sqrt[1,6]{\frac{\sim_2}{\sim_1}}$$

Erweitern wir linker Hand den Bruch mit dem Querschnitt Q des Kraftlinienweges und beachten, daß $\mathfrak{B} \cdot Q = \Phi$ ist, so findet man:

$$\frac{\Phi_1}{\Phi_2} = \sqrt[1,6]{\frac{\sim_2}{\sim_1}} \dots \dots \dots 5)$$

Da nun der induktive Spannungsabfall der Größe Φ umgekehrt proportional ist, so wird der Spannungsabfall um so geringer sein, je niedriger \sim ist.

Ein Transformator, der bei $\sim = 50$ einen induktiven Spannungsabfall von 3% hat, besitzt z. B. bei $\sim = 25$ nur 1,95%, und bei $\sim = 75$ einen Spannungsabfall von 3,8%, unter sonst gleichen Verhältnissen.

Wo nur Elektromotoren in Frage kommen, nicht aber Abgabe elektrischer Energie für Beleuchtungszwecke, wird man daher die Periodenzahl \sim niedrig wählen.

Die auf dem europäischen Kontinent allgemein eingeführte Periodenzahl $\sim = 50$ ist die niedrigste, bei der die Bogenlampen noch kein störendes Flimmern zeigen, zumal nicht, wenn sie mit über dem Lichtbogen gelegenen Reflektoren versehen sind. (Vergl. Kap. 7, 2, S. 86).

2. Die Arbeitsdiagramme eines wirklichen Transformators.

Um Aufgaben über Transformatoren graphisch lösen zu können, ist es nötig die auf die eine Wicklung bezüglichen Größen im Umsetzungsverhältnisse zu reduzieren, da sonst in demselben Diagramm Größen von außerordentlich verschiedenem Betrage auftreten würden, für die es schwer sein würde einen passenden Maßstab zu finden. Auch würden zum Teil so flachwinkelige Parallelogramme auftreten, daß die Schnittpunkte nur unsicher bestimmt werden könnten.

Wir tragen also z. B. in die Diagramme die EMKräfte in der Hochspannungsentwicklung, statt E_p und E_p^S die Größen $\frac{n_s}{n_p} \cdot E_p$ und $\frac{n_s}{n_p} \cdot E_p^S$ im Umsetzungsverhältnis vermindert und den zugehörigen Strom in gleichem Maßstabe erhöht, also statt J_p den Wert $J_p \cdot \frac{n_p}{n_s}$ ein. Wir haben dann an Stelle des wirklichen Transformators gewissermaßen einen solchen mit dem Umsetzungsverhältnis 1 : 1 vor uns, in dem aber Erwärmung, Leerlaufstrom, Eisenverluste, Wirkungsgrad usw. sämtlich dieselben sind, wie beim wirklichen Transformator.

Wir betrachten zunächst den Fall der induktionsfreien Belastung, bei der Sekundärstrom Oi_s und sekundäre Klemmenspannung OE_s^K in

dieselbe Gerade fallen. Mit Rücksicht auf den Spannungsverlust durch Stromwärme muß OE_s^K noch um den Betrag $J_s \cdot n_s = E_s^K E_s'$ vergrößert werden.

Die EMK des Streufeldes E_s^S der Sekundärspule bleibt um 90° hinter dem Strome zurück, muß also unter diesem Winkel im Maßstab der Volt nach links angetragen werden. E_s' muß die vektorielle Summe aus der in der sekundären Wicklung induzierten EMK E_s und der EMK der Streuung sein. Dadurch finden wir, wenn wir $E_s' E_s \parallel OE_s^S$ und $OE_s \parallel E_s^S E_s'$ ziehen, die in der Sekundärspule induzierte EMK OE_s nach Größe und Phase.

In der Verlängerung von OE_s liegt OE_p und ist von gleicher Größe (unter Berücksichtigung des Faktors $\frac{n_s}{n_p}$). Senkrecht dazu liegt der wattlose Magnetisierungsstrom J_M , der hinter der Primärspannung E_p um 90° in der Phase zurückbleibt. Wir tragen ihn im Maßstabe der Ampère als OJ_M auf. In der Richtung von E_p liegt die Wattkomponente OJ_H des Leerlaufstromes, durch die die Eisenverluste (Hysteresis, Wirbelströme) gedeckt werden. Demnach ist die Resultante aus OJ_M und OJ_H der Leerlaufstrom OJ_o .

Die primäre Stromstärke OJ_p ist die vektorielle Summe aus OJ_s und OJ_o , somit die Diagonale eines Parallelogrammes, dessen Seiten OJ_o und $J_o J_p$ sind, wobei $J_o J_p$ parallel und gleich OJ_s ist. Da J_M nur wenige Prozent von J_p ist, so fallen in Wirklichkeit J_p und J_s nahezu in die gegenseitige Verlängerung.

Die primäre Stromstärke J_p veranlaßt nun das primäre Streufeld und die EMK E_p^S der dadurch bedingten Selbstinduktion, die um 90° hinter dem Strome zurückbleibt. Wir ziehen daher OE_p^S senkrecht zu OJ_p und machen es im Maßstabe der Volt gleich E_p^S . Eine Parallele zu OE_p^S von gleicher Größe, aber entgegengesetzter Richtung $E_p N$ tragen wir an E_p an; das ist die Komponente der primären EMK, die der EMK des primären Streufeldes E_p^S das Gleichgewicht hält. Außerdem fügen wir noch den Ohmschen Spannungs-

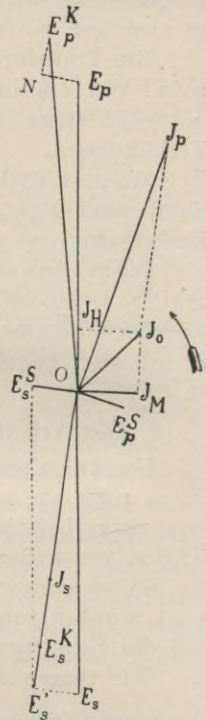


Fig. 233. Arbeitsdiagramm des Transformators bei induktionsfreier Belastung.

verlust durch Stromwärme $NE_p^K = J_p \cdot w_p$ hinzu, der mit dem Strome J_p in gleicher Phase ist. So ist nunmehr OE_p^K nach Größe und Richtung die primäre Klemmenspannung.

Man erkennt sofort, daß E_p^K erheblich größer als E_s^K ist, daß also ein Spannungsverlust stattfindet. Derselbe erscheint in der Figur übertrieben groß, denn in Wirklichkeit ist E_s^S und E_p^S etwa nur 1,5% von E_s und J_o nur etwa 2% von J_p .

Trotz dieser unmaßstäblichen Zeichnung erkennt man aber, daß die Größe E_s^S und E_p^S , die wegen des symmetrischen Baues der Transformatoren nahezu gleich sind, fast völlig in eine Linie fallen, und daß auch J_p und J_s nahezu in der gegenseitigen Verlängerung liegen.

3. Bestimmung der Streuung aus einem Versuche mit kurzgeschlossener Sekundärwicklung.

Man schließt die sekundäre Wickelung kurz durch ein Ampèremeter und steigert die den Klemmen der Primärwicklung zugeführte Spannung von null beginnend so lange, bis die Sekundärwicklung von der bei Höchstbelastung zulässigen Stromstärke durchflossen wird. Die an den Primärklemmen erforderliche Spannung wird mit einem Hitzdrahtvoltmeter gemessen.

In dem vorigen Diagramm ist dann die sekundäre Klemmenspannung $E_s^K = 0$. E_s' rückt nahe an den Nullpunkt heran. J_s und J_p fallen nahezu in eine gerade Linie; die primäre Klemmenspannung (E_p^K) wird die Hypotenuse eines rechtwinkligen Dreieckes, dessen eine Kathete $E_p^S + E_s^S$ und dessen andere Kathete $J_s \cdot w_s + J_p \cdot w_p$ wird.

Die bei kurzgeschlossener sekundärer Wickelung und höchster zulässiger sekundärer Stromstärke beobachtete primäre Klemmenspannung (E_p^K) ist somit ein vorzügliches Mittel, um die Verluste im Transformator zu beurteilen.

Da man nun $J_s \cdot w_s$ und $J_p \cdot w_p$ leicht berechnen kann, die primäre Klemmenspannung gemessen wird, so kann man auf diese Weise die Summe $E_p^S + E_s^S$ ermitteln,

$$E_p^S + E_s^S = \sqrt{(E_s^K)^2 - (J_s \cdot w_s + J_p \cdot w_p)^2} \quad . \quad . \quad 6)$$

Da aber außerdem E_p^S wegen des nahezu völlig symmetrischen Baues der beiden Wickelungen sehr nahe gleich E_s^S sein wird, so kann man ohne erheblichen Fehler

$$E_p^S = E_s^S = \frac{E_p^S + E_s^S}{2}$$

setzen und auf diese Weise die für die Streuung des Transformators charakteristischen Größen bestimmen.

Man konstruiert für Vollbelastung das Dreieck $OE_p^K E_s^K$, wie in Fig. 234, schlägt in Fig. 235 mit der konstanten primären (reduzierten) Klemmenspannung OE_p^K einen Kreis um O und zeichnet sich darunter eine Gerade AB senkrecht zu OE_s^K .

Auf diese Gerade projiziert man auch durch eine Senkrechte $E_p^K B$ den Punkt E_p^K .

Die Länge BA ist dann der Stromstärke bei Vollbelastung proportional.

Für $\frac{1}{m}$ der Vollbelastung wählt man nun einen Punkt C, sodaß $\overline{AC} = \frac{1}{m} \overline{AB}$ ist, projiziert C rückwärts auf die Kreisperipherie, indem man auf AB in C eine Senkrechte errichtet, und legt durch den erhaltenen Punkt D eine Parallele zur Geraden $E_p^K E_s^K$. Dann ist AG der Spannungsabfall bei $\frac{1}{m}$ Belastung, und AE_s^K der Spannungsabfall bei Vollbelastung.

Beispiel: Bei einem Transformator für 10 Kilowatt sei bei Vollbelastung $E_s = 100$ Volt, $E_p = 2000$ Volt, somit $\frac{n_s}{n_p} = \frac{1}{20}$ das Umsetzungsverhältnis; dann ist $J_s = 100$ Ampère die Vollbelastung. Der Spannungsverlust durch Stromwärme bei Vollbelastung in der primären Wickelung ist 20 Volt, reduziert im Umsetzungsverhältnis 1 Volt, ebenso groß sei $J_p \cdot w_p = 1$ Volt.

Ferner betrage der induktive Spannungsabfall durch magnetische Streuung in jeder Spule 4%, somit $E_p^S + E_s^S = 8$ Volt (E_s^S ist ebenfalls im Umsetzungsverhältnis reduziert).

Dann ist bei Vollbelastung:

$$E_p^K \cdot \frac{n_s}{n_p} = \sqrt{(E_s^K + J_s \cdot w_s + J_p \cdot w_p)^2 + (E_s^S + E_p^S)^2} \\ = \sqrt{102^2 + 8^2} = 102,3 \text{ Volt.}$$

Der Spannungsabfall beträgt 2,3 Volt, da die Sekundärspannung bei Vollbelastung 100 Volt ist.

Bei halber Belastung ist dann $E_p^K \cdot \frac{n_s}{n_p} = 101,1$, der Spannungsabfall beträgt 1,1 Volt, demnach ist $E_s = 101,2$.

Bei Leerlauf würde $E_s = 102,3$ Volt betragen.

Bei dem Doppelten der Vollbelastung, was ein guter Transformator vorübergehend aushalten muß, würde der Spannungsabfall 5% betragen, die Klemmenspannung würde nur 97 Volt sein.

Auf sehr große Genauigkeit kommt es bei derartigen Rechnungen und Konstruktionen nicht an, da es nicht leicht möglich ist Wechselspannungen auf mehr als $\frac{1}{2}\%$ sicher zu messen.

5. Vorausbestimmung des Spannungsabfalles bei induktiver Belastung.¹⁾

Es ist schon schwierig und infolge des starken Energieaufwandes auch recht kostspielig, wenn man einen größeren Transformator mit nichtinduktivem Widerstand voll belasten und auf diese Weise den Spannungsabfall bei voller Inanspruchnahme experimentell bestimmen will.²⁾ Noch seltener aber stehen induktive Widerstände von passender Selbstinduktion und entsprechender Größe zur Verfügung, um für verschiedene Leistungsfaktoren der Belastung des Sekundärkreises den Spannungsabfall durch Versuche ermitteln zu können.

Es ist daher sehr wertvoll, daß Kapp ein Verfahren angegeben hat, welches gestattet bei Vollbelastung für verschiedene Leistungsfaktoren der induktiven Belastung den entstehenden Spannungsabfall graphisch zu ermitteln.

Man berechnet entweder, wenn es sich um eine noch nicht ausgeführte Konstruktion handelt, $E_p^S + E_s^S$ nach den auf S. 303 gegebenen Gleichungen 4), oder man ermittelt diese Summe dadurch, daß man der primären Wickelung des Transformators eine solche EMK eines Wechselstromes von gleicher Periodenzahl und gleicher Kurvenform zuführt, daß ein Ampèremeter, durch welches man die Windungen der sekundären Wickelung kurzschließt, die Stromstärke bei Vollbelastung anzeigt.

Die bei diesem Kurzschlußversuche gefundene primäre Klemmenspannung (bei guten Transformatoren, die auch für induktive Belastung geeignet sind, soll diese Spannung nicht mehr als 4% der normalen Primärspannung betragen) gibt durch Multiplikation mit dem Umsetzungsverhältnis mit für die Praxis genügender Genauigkeit³⁾ $E_p^S + E_s^S$.

Ebenso kennt man aus den Konstruktionsdaten $J_p \cdot w_p$ und $J_s \cdot w_s$, oder man kann bei einem fertig vorliegenden Transformator die Widerstände w_p und w_s durch Messung leicht ermitteln und daraus, da J_p und J_s bekannt sind, $J_p \cdot w_p + J_s \cdot w_s$ berechnen.

¹⁾ Zuerst mitgeteilt von G. Kapp, ETZ 1895, S. 260.

²⁾ Große Zersetzungszellen oder Wasserwiderstände kann man bei Wechselstrom nicht benutzen, da dieselben große Kapazität besitzen.

³⁾ Eigentlich ist die gefundene Primärspannung

$$\sqrt{(E_p^S + E_s^S)^2 + (J_s \cdot w_s)^2}$$

($J_p \cdot w_p$ ist bei diesem Versuche verschwindend klein). Da $J_s \cdot w_s$ aber meist sehr klein ist, beträgt der Wurzelwert sehr nahe $E_p^S + E_s^S$.

sekundäre Klemmenspannung $OB = E_s^K$. Ferner ist $BB' = J_s \cdot w_s$ (dem Stromvektor J_s parallel) und $DO' = J_p \cdot w_p$ (ebenfalls dem Stromvektor J_p parallel). Außerdem ist $CB' = E_s^S$, somit OC (vergl. das Diagramm Fig. 234, S. 308) die in der sekundären Wicklung induzierte EMK E'_s .

Da nun ferner $DC = E_p^S$ und $DO' = J_p \cdot w_p$ ist, so ist OO' die im Umsetzungsverhältnis reduzierte primäre Klemmenspannung

$$OO' = \frac{n_s}{n_p} \cdot E_p^K.$$

Da die Primärspannung und somit auch $\frac{n_s}{n_p} E_p^K$ konstant angenommen worden ist, ist der geometrische Ort der Punkte O' der Kreis um O .

Das Diagramm Fig. 236 gibt noch zu einigen weiteren Bemerkungen Veranlassung. Ist die Vollbelastung induktionsfrei, so sind sekundäre Spannung und Stromvektor in gleicher Phase, somit ist $\varphi = 0$ und $B_0 E_0$ stellt den Spannungsabfall dar.

Man erkennt ferner, daß der Spannungsabfall anfänglich ziemlich rasch, später langsamer mit abnehmendem Leistungsfaktor F (also zunehmendem φ) wächst.

Wenn $B_1 O$ jedoch in die Verlängerung von OR' fällt, wird der Höchstwert des Spannungsabfalles erreicht, um später, für noch größere Werte von φ , wieder abzunehmen. Der Höchstwert ist sichtlich gleich $OR' = \sqrt{(E_s^S + E_p^S)^2 + (J_s \cdot w_s + J_p \cdot w_p)^2}$.

Veranlaßt die Reaktanz der Belastung, weil sie vorwiegend Kapazität besitzt, eine negative Phasenverschiebung, so nimmt der Spannungsabfall mit wachsendem φ rasch ab, und erreicht für einen bestimmten Wert von φ den Wert null. Dieser Umstand tritt im vorliegenden Fall z. B. ein, wenn $-\varphi = AOB_2$ ist. Für noch größere Werte von $-\varphi$ ist dann $OB_4 > OE_4$, d. h. bei starker Belastung durch Kondensatoren findet ein negativer Spannungsabfall, d. h. eine Spannungszunahme statt.

Mit Rücksicht auf den Fall OB_2 hat man oft vorgeschlagen durch parallel zu den sekundären Klemmen geschaltete Kondensatoren von passender Größe die Transformatoren frei von Spannungsabfall zu machen.

Mit Hilfe dieses von Kapp angegebenen, höchst wichtigen Diagramms kann man somit den Spannungsabfall eines Transformators für alle möglichen Fälle der Vollbelastung vorher mit einer für die Praxis genügenden Genauigkeit bestimmen.

Auch für alle sonstigen Fälle können ähnliche Konstruktionen ausgeführt werden. Für den mten Teil der Vollbelastung wird sich dann nur das Dreieck OSR im gleichen Verhältnis verkleinern, da sowohl die durch $E_s^S + E_p^S$ gemessene Streuung, als auch der Spannungsverlust durch Stromwärme $J_s \cdot w_s + J_p \cdot w_p$ sich proportional der Stromstärke verringern.

Den Praktiker interessiert aber meist nur der größte Spannungsabfall, der bei Vollbelastung mit induktivem Widerstand von bekanntem Leistungsfaktor eintreten wird.

18. Kapitel.

Beschreibung ausgeführter Transformatoren.

1. Transformator von Siemens & Halske, A.-G.

Hinsichtlich der praktischen Ausführung der Transformatoren weichen die Konstruktionen der verschiedenen Firmen nicht unerheblich voneinander ab. Wesentliche Abweichungen ergeben sich auch je nach dem Zwecke, für den diese Apparate bestimmt sind.

Ein charakteristisches Beispiel eines Kerntransformators für einphasigen Wechselstrom gibt nebenstehender Aufriß und Grundriß (Fig. 238) einer Konstruktion von Siemens & Halske.

Die quadratischen Eisenkerne sind von runden Spulen umgeben, und zwar ist jede der beiden Hochspannungsspulen in vier voneinander durch isolierende Zwischenschichten getrennte Abteilungen, die andere Wickelung jedes Kernes in zwei Abteilungen zerlegt. Falls eine Abteilung beschädigt wird, kann das obere Joch von den Kernen abgeschraubt und die betreffende Spule ausgewechselt werden. In den Luftzwischenräumen zwischen den Kernen und inneren Spulenwänden entstehen infolge der Erwärmung kräftige, aufsteigende Luftströme, durch die eine starke Abkühlung bewirkt wird.

Durch die im Boden der Grundplatte angebrachten Löcher werden die Drähte zu- und abgeführt und tritt Luft zu. Die Anschlußklemmen und Bleisicherungen werden auf einem an der Grund- und Deckplatte befindlichen Klotze aus gut isolierendem Materiale angebracht.

Der ganze Apparat ist außen von einem Blechmantel umgeben, und an der Stelle, an der die Klemmen sich befinden, hat das Gehäuse eine Tür, die für gewöhnlich geschlossen gehalten wird, im Bedarfsfalle jedoch geöffnet werden kann.

Das Dach des Gehäuses ist so konstruiert, daß die erwärmte Luft leicht entweichen, aber keine Nässe von außen eindringen kann.

Im Prinzip ganz ähnlich konstruiert sind die Transformatoren für dreiphasigen Wechselstrom oder Drehstrom von Siemens & Halske, die in Fig. 239 in Grund- und Aufriß dargestellt sind. Die Abbildung Fig. 240 zeigt einen solchen Apparat in einem Schutzgehäuse aus durchlöcherterem Blech, wie er in gedeckten, vor den Unbilden des

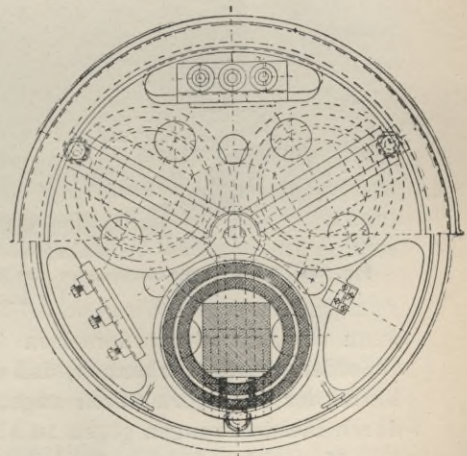
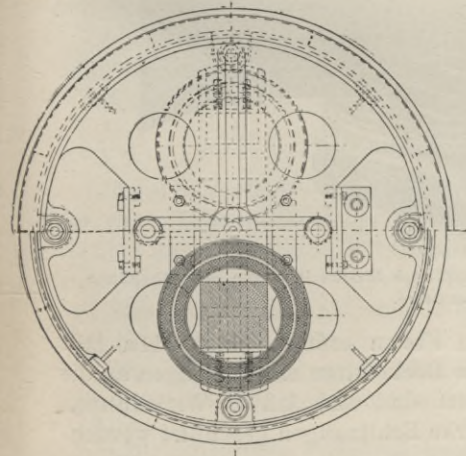
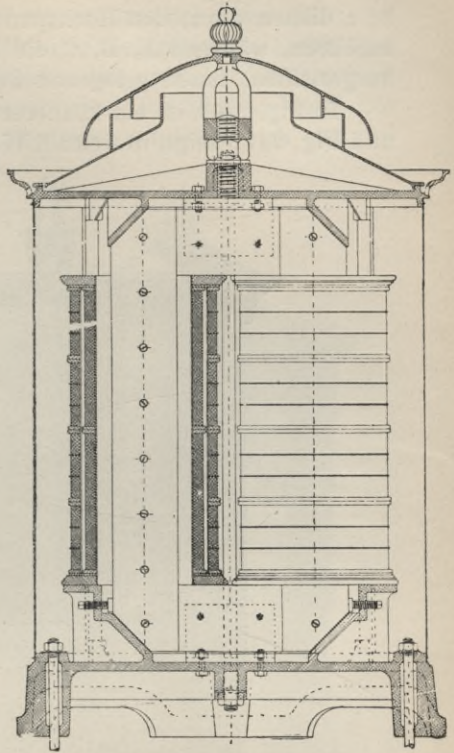
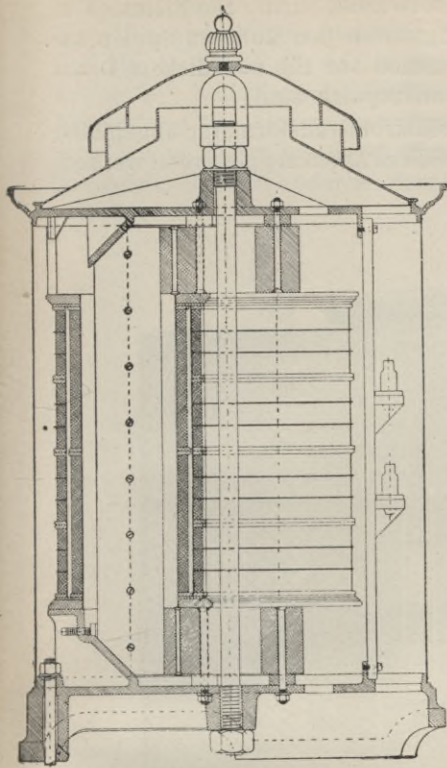


Fig. 238. Wechselstromtransformator von Siemens & Halske.

Fig. 239. Drehstromtransformator von Siemens & Halske.

Wetters völlig geschützten Räumen verwendet wird. Die Klemmen a, b, c dienen dazu, den Hochspannungsstrom den äußeren Spulen zuzuführen, während A, B, C die Klemmen für die aus dickem Draht hergestellten, innen gelegenen Sekundärspulen sind.

In Fig. 241 a ist ein kleinerer Drehstromtransformator abgebildet, und Fig. 241 b zeigt, in welcher Weise diese Apparate geschützt werden,

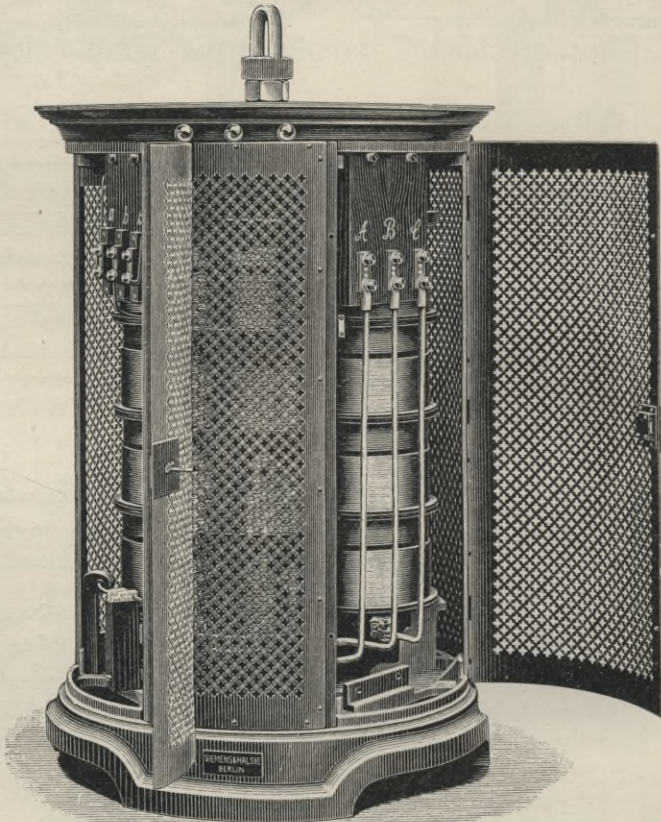


Fig. 240. Drehstromtransformator von Siemens & Halske in einem Schutzgehäuse für Innenräume.

wenn die Aufstellung derselben im Freien erfolgt. Fig. 241 a läßt außerdem deutlich erkennen, daß die Deckplatten mit Stoßfugen an die Kerne der Transformatoren angesetzt sind und daß die Wickelungen durch Bleisicherungen gegen zu starke Erhitzungen geschützt werden.

Man sieht, daß ein Drehstromtransformator aus drei durch gemeinsame Endplatten oben und unten miteinander verbundenen, um

120° gegeneinander versetzten Eisenkernen besteht. Jeder Kern hat eine Hochspannungs- und eine Niederspannungswicklung.

Da die Phase der drei in den Leitungen fließenden Wechselströme um je 60° beziehentlich 120° verschieden ist, entstehen in den drei Kernen der Transformatoren drei verschiedene Kraftlinienfelder. Die in je einem Kerne erzeugten Kraftlinienfelder schließen sich alsdann durch die beiden anderen Kerne.¹⁾

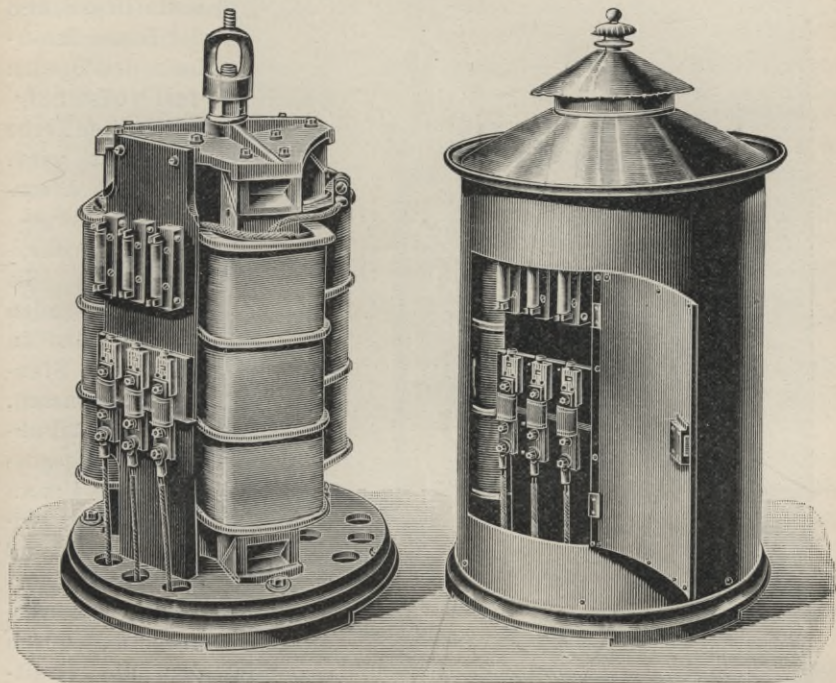


Fig. 241 a. Kleinerer Drehstromtransformator von Siemens & Halske.

Fig. 241 b.

Sowohl die drei Wicklungen der Hochspannungsleitungen, als die drei Wicklungen, die Strom von geringer Spannung führen, sind je an einem Ende miteinander verbunden, während die je drei anderen Enden an die äußeren Leitungen angeschlossen sind.

Ein Drehstromtransformator hat daher drei Hochspannungs- und drei Niederspannungsklemmen.

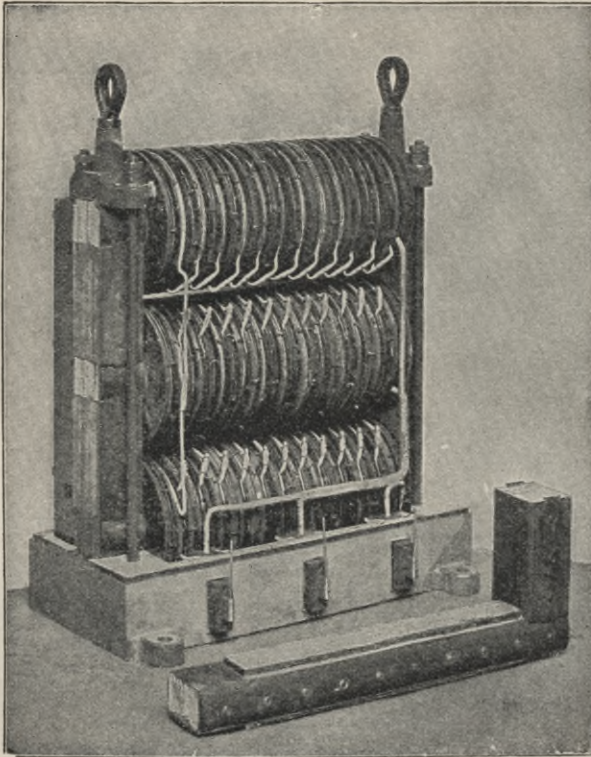
Man kann selbstverständlich die Umformung der drei einen Drehstrom bildenden verketteten Wechselströme auch durch drei getrennte

¹⁾ Die magnetische Verkettung der drei Kraftlinienströme ist zuerst von dem Chefelektriker der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft von v. Dobrowolski angegeben worden.

Transformatoren bewerkstelligen. Dies bedingt jedoch einen erheblichen Mehraufwand an Eisen.

2. Transformatoren der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft.

Die Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft in Berlin gibt ihren Kerntransformatoren insofern eine andere Anordnung, als die



Eisenkerne horizontal liegen, und der Raum innerhalb der Spulen fast vollständig durch diese Kerne ausgefüllt wird. Die aus Eisenblechen hergestellten Joche, durch die die Kerne verbunden werden, sind in gußeiserne Ständer eingelassen, die an das Fußgestell angegos- sen sind. Um an der Stoßfuge zwischen Kernen und Joch den Querschnitt zu vergrößern, durch den die Kraftlinien übergehen können, sind die Kerne mit Einschnitten versehen

Fig. 242. Drehstromtransformator der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft.

hen, in welche die Vorsprünge der Joche gerade hineinpassen.

Die Abbildung 242 zeigt einen Drehstromtransformator dieser Firma im fertigen Zustande nach Entfernung des Schutzgehäuses.

Die parallele Anordnung der drei Kerne hat den Vorteil, daß sich nach Lösung der rechts und links am Gestell sichtbaren Schrauben mit langem Bolzen ein Kern nach dem anderen samt daran sitzenden Spulen herausnehmen läßt.

Um die Streuung auf einen sehr geringen Betrag zu bringen, sind primäre und sekundäre Wickelung zum Teil übereinander, zum

Teil in vielen Abteilungen abwechselnd nebeneinander angeordnet. Dadurch ist der große Vorteil erreicht, daß auch bei Belastung mit Elektromotoren, deren Ströme große Phasenverschiebung zeigen, der hierdurch veranlaßte Spannungsabfall höchstens 4% beträgt.

Durch Verwendung eines besonderen Isolationsmaterialies, des Kunstglimmers oder Mikanits, das die Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft selbst herstellt, kann eine so treffliche Isolation erreicht werden, daß solche Transformatoren selbst für Spannungen von 25000 Volt brauchbar bleiben.

Für den in Fig. 242 abgebildeten Transformator hat uns die Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft gütiger Weise folgende Angaben zur Verfügung gestellt. Spannung zwischen zwei Leitungen, primär 2750 Volt, sekundär 120 Volt. Zahl der Perioden 50. Beide Wickelungen Sternschaltung. Primäre Wickelung: 6 hintereinander geschaltete Spulen auf jedem Kerne, jede Spule 273 Windungen, 13 nebeneinander, 21 Lagen übereinander, aus Draht von 2,5 mm Dicke (3 mm besp.). Drahtlänge per Spule 173 m. Kupfergewicht per Spule 7,8 kg. Sekundäre (Niederspannungs)-Wickelung: 7 parallel geschaltete Spulen auf jedem Kerne, 72 Windungen in jeder Spule, 6 nebeneinander, 12 Lagen übereinander. Zur Wickelung dient rechteckiger Draht 4×5 mm (isoliert 5×6), hochkant gestellt. Drahtlänge per Spule 45 m. Kupfergewicht per Spule 7,5 kg. Querschnitt der Sammelschienen 70 qmm.

Die Figur zeigt auf der uns zugewendeten Seite die drei Hochspannungsklemmen. Die drei Klemmen für den sekundären Strom befinden sich auf der Rückseite.

Vorn vor dem Apparate liegt ein von den Spulen und der Isolation entblößter Eisenkern. Die Abbildung läßt deutlich erkennen, in welcher Weise die Eisenbleche durch Schrauben und Metallstreifen zusammengehalten werden.

Denken wir uns von einem solchen Drehstromtransformator, wie ihn Fig. 242 darstellt, einen Kern mit seinen Spulen weg, so erhalten wir einen gewöhnlichen Wechselstromtransformator.

Transformatoren für sehr hohe Spannungen werden in Kästen eingesetzt, die mit Öl gefüllt sind. Das Öl führt die Wärme besser ab als Luft, wenn in beiden Fällen der Kasten völlig geschlossen ist; man kann daher Öltransformatoren stärker beanspruchen, das Öl bleibt aber viel länger warm und Ausbesserungen an einem in Öl befindlichen Transformator sind eine höchst unsaubere und unangenehme Arbeit. Man wendet daher Ölisolation nur bei Apparaten an, die im Freien oder in feuchten Räumen aufgestellt werden sollen oder für außergewöhnlich hohe Spannungen bestimmt sind.

3. Neuer Transformator von Helios.

Die Helios Elektrizitäts-Aktien-Gesellschaft stellt seit 1899 bei neueren Transformatoren die Eisenkerne dadurch her, daß sie aus den Blechtafeln B (Fig. 243) eigenartig geformte fünfeckige

Stücke A ausstanzt, zu kleinen Paketen vereinigt und nach dem Aufbringen der Spulen abwechselnd derart einlegt, daß die beiden Trennungsstellen mit großer Fläche von den Blechen überdeckt sind (vergl. Fig. 244).

Die nächste Abbildung (Fig. 245) stellt einen solchen Transformator in fertigem Zustande ohne Schutzkasten dar.

Derartige Konstruktionen eignen sich zur fabrikmäßigen Herstellung, da alle Einzelheiten gesondert als Massenartikel

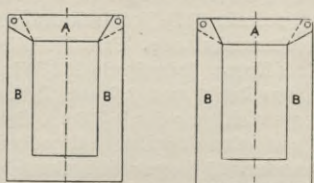


Fig. 243. Eisenbleche eines Helios-Transformators.

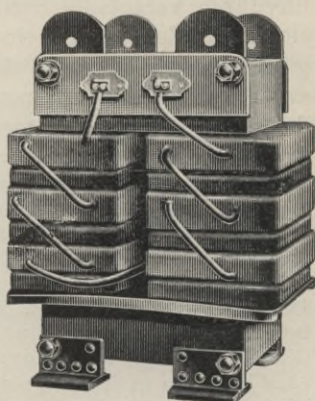


Fig. 245. Einphasentransformator von Helios.

angefertigt und dann erst zusammengebaut werden.

Diese Apparate sind durch geringe Eisenverluste, schwache Streuung, kleinen Leerstrom ausgezeichnet.

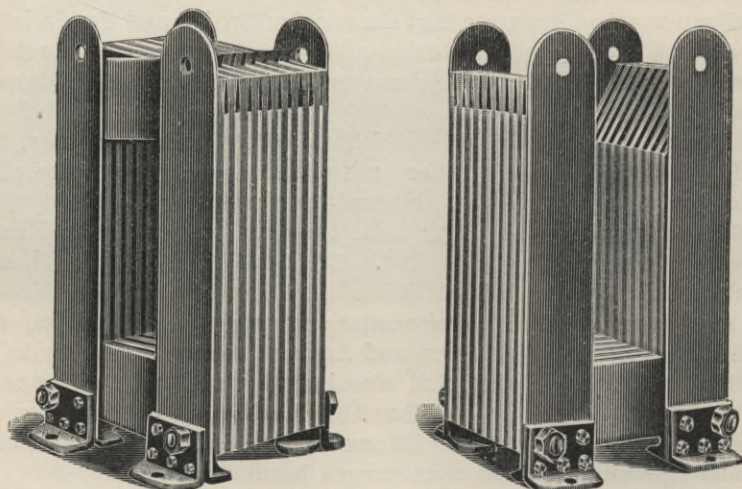


Fig. 244. Eisenkerne der neuen Helios-Transformatoren.

4. Transformator der Maschinenfabrik Oerlikon.

Für einphasigen Wechselstrom benutzt Oerlikon den in Fig. 246 dargestellten Manteltransformator mit langem Kern, zylindrischer

Wicklung und schmalen Mantel. Um die Gestalt des Querschnittes des inneren Kernes der Kreisform möglichst zu nähern, wird die Breite der Eisenbleche nach außen hin geringer. Die Anordnung der Spulen, die auf Zylinder von Papiermasse gewickelt sind, kann aus der Abbildung gut ersehen werden. Der nicht von den Spulen umfaßte Teil des Eisenkörpers ist in ein gußeisernes Gehäuse eingebettet. Die äußeren Seiten der Spulen werden durch zwei durchlöchernte Bleche vor Beschädigungen geschützt.

Bei einem für eine Leistung von 20 Kilowatt bestimmten Transformator, der von 1000 auf 100 Volt umsetzt, besteht die primäre Wicklung aus 450 Windungen eines Drahtes von $5,3\text{ mm}$ ($5,8\text{ mm}$) Dicke. Die sekundäre Wicklung ist aus zwei parallel geschalteten Wicklungen gebildet, deren jede aus $9,5 \times 10\text{ mm}$ ($10,5 \times 11\text{ mm}$) Kupfer von nahezu quadratischem Querschnitt angefertigt ist, und 23 Windungen besitzt. Das Kupfergewicht der primären Wicklung beträgt 63 kg , das der sekundären 86 kg .

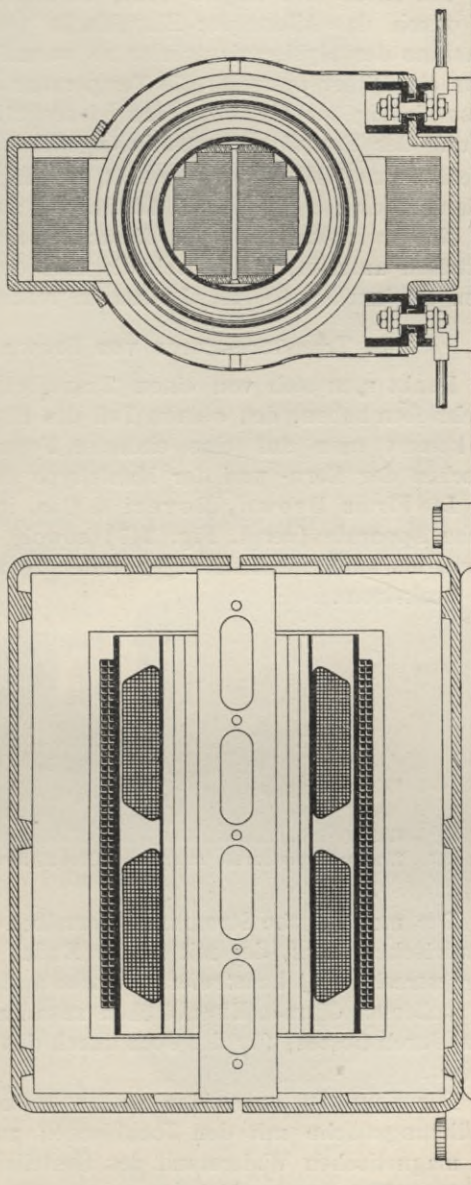


Fig. 246. Manteltransformator der Maschinenfabrik Oerlikon.

Besonders ist bei diesen Transformatoren für reichliche Abkühlungsflächen und gute Lüftung gesorgt.

Um Eisen und Kupfer höher beanspruchen zu können und um die durch das Altern der Eisenbleche (vergl. S. 274) verursachte Zunahme der Hysteresisverluste zu vermeiden, ist man neuerdings mehr als früher bestrebt, die Temperatur der Transformatoren möglichst niedrig zu erhalten. Man ist deshalb wieder mehrfach zur Einbettung der Transformatoren in Ölfäße zurückgekehrt und hat die Ölfäße aus Wellblech hergestellt, mit Rippen versehen, oder Kühlschlangen eingelegt, um die Abkühlung zu begünstigen.

Noch wirksamer sind in dieser Beziehung Ventilatoren, die man elektrisch antreibt, und durch die man eine kräftige Kühlung durch einen hindurch geführten Luftstrom verursacht.

5. Transformatoren von Brown, Boveri & Cie.

Denkt man sich von einem Transformator, wie wir ihn soeben beschrieben haben, den oberen Teil des Eisenkörpers weggeschnitten, so kommt man auf eine einfache Form, die eine Mittelstellung zwischen der Kern- und der Manteltype annimmt.

Die Firma Brown, Boveri & Cie. in Baden (Schweiz) benutzt solche Apparate (vergl. Fig. 247) sowohl für einphasigen Wechselstrom, als auch für Leistungen unter 20 Kilowatt, je drei derselben für Drehstrom.

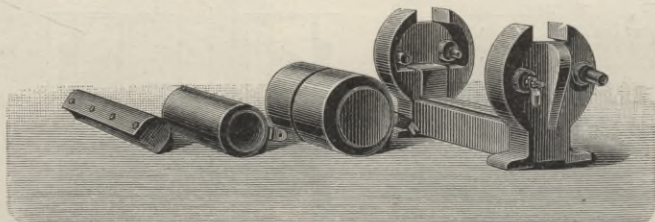


Fig. 247. Wechselstromtransformator von Brown, Boveri & Cie., in seine Bestandteile zerlegt.

Der magnetische Stromkreis derselben besteht aus einem nahezu zylindrischen Kern, der mit seinen Enden auf einem in Form eines langgestreckten U konstruierten Joch aufliegt. Kern und Joch sind aus isolierten dünnen Eisenblechen zusammengesetzt, welche für den Kern durch Bolzen, für das Joch durch das Gestell zusammengehalten werden.

Der Kern ist an seinen Enden etwas eingeschnitten, um die Berührungsfläche mit den Jochblechen zu vergrößern und mithin den magnetischen Widerstand des Gestelles und mit ihm die Leerlaufstromstärke zu verkleinern.

Die Spulen sind einzeln hergestellt und auf aus Preßspan und Glimmer gefertigte Zylinder gewickelt. Sie werden ineinander ge-

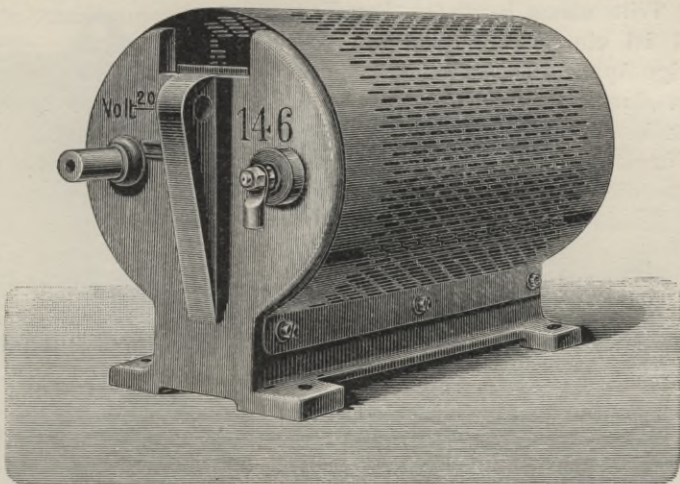


Fig. 248. Halbmanteltransformator von Brown, Boveri & Cie. im Schutzgehäuse.

schoben, sodaß sie voneinander und vom Kerne durch die rund 6 mm dicken Preßspanzylinder getrennt und isoliert sind. Vor mechanischer Beschädigung werden die fertig montierten Transformatorspulen durch ein am Gestelle befestigtes durchlöcheretes Schutzblech geschützt.

Die Anschlußklemmen sind an den Endstücken des Gestelles angebracht und zwar so, daß das eine Endstück die beiden Klemmen der einen, das andere diejenigen der anderen Spule trägt. (Vergl. Fig. 248.)

Die nächsten drei Abbild., Fig. 249, 250 und 251, stellen einen Kerntransformator in einem gußeisernen Kasten mit Ölfüllung dar, wie solche von Brown, Boveri & Cie. in Baden (Schweiz) und Frankfurt a. M. hergestellt werden. Fig. 249 zeigt den Apparat mit geschlossener Hülle, bei Fig. 250 ist der Deckel gedreht, sodaß die ausschaltbaren Bleisicherungen sichtbar sind. In der folgenden

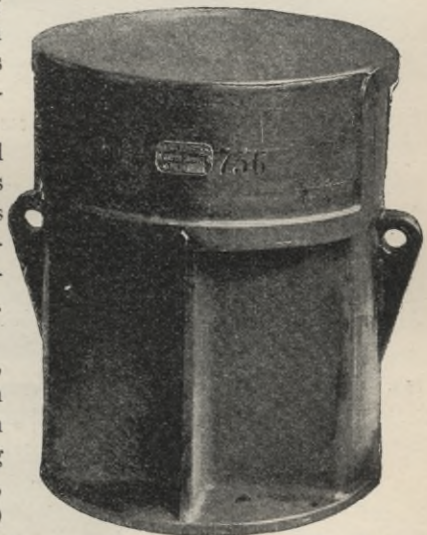


Fig. 249. Kerntransformator in Ölgefäß von Brown, Boveri & Cie.

Fig. 250 ist der Deckel gedreht, sodaß die ausschaltbaren Bleisicherungen sichtbar sind. In der folgenden

Abbildung (Fig. 251) endlich ist der Transformator aus dem Schutzkasten ziemlich vollständig herausgehoben, sodaß man die Anordnung seiner Teile sehen kann. — Der Verschuß ist ein so zuverlässiger, daß derartige Apparate ohne jeden weiteren Schutz dauernd im Freien aufgestellt werden können.

Für trockene Innenräume verwendet dieselbe Firma aber auch

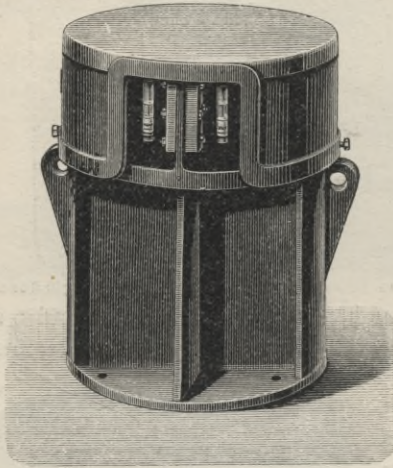


Fig. 250.

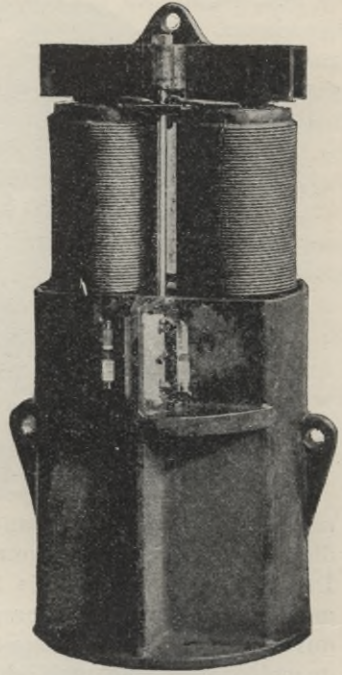


Fig. 251.

Kerntransformator in Ölgefäß von Brown, Boveri & Cie.

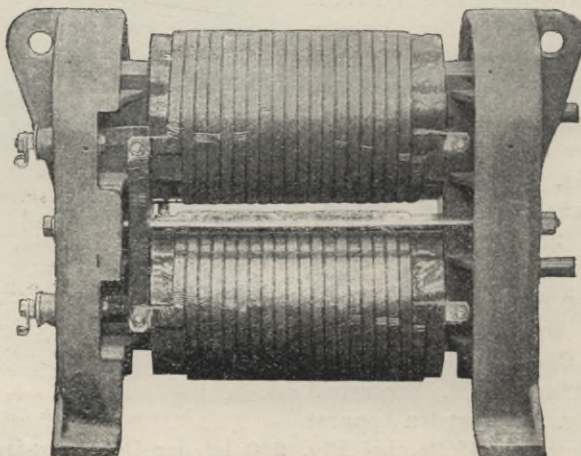


Fig. 252. Kerntransformator von Brown, Boveri & Cie.

Wechselstromtransformatoren mit horizontaler Anordnung der Kerne. (Vergl. Fig. 252.) Der durchlöchererte Blechmantel ist weggenommen, um die Anordnung der Teile besser sichtbar zu machen.

Für größere Leistungen oder für Umsetzung von verketteten Zweiphasenströmen wird der in Fig. 253 dargestellte Kerntransformator verwendet.

Man ersieht sofort, daß die starke Ströme führende Sekundärspule sich außen befindet und aus isoliertem Kupferband, nicht aus Draht hergestellt ist. Als Träger für die Hochspannungszuführungen dienen Porzellanisolatoren.

Für Drehstrom benutzen Brown, Boveri & Cie. Transformatoren mit drei in einer Ebene liegenden, parallelen Eisenkernen, ähnlich der in Fig. 252 abgebildeten Form.

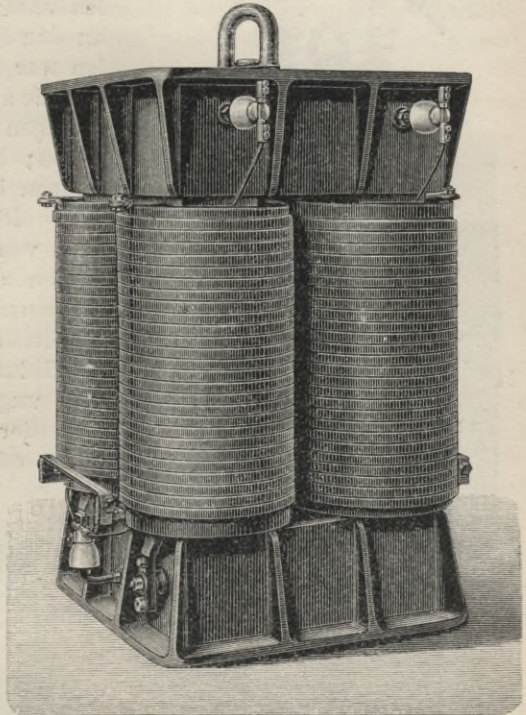


Fig. 253. Kerntransformator für verkettete Zweiphasenströme von Brown, Boveri & Cie.

6. Transformatoren der E.-A.-G. vorm. W. Lahmeyer & Co.

Die zur Zusammensetzung eines Drehstromtransformators erforderlichen Konstruktionsteile zeigt die Fig. 254, die sich auf einen von obengenannter Firma hergestellten Apparat bezieht. Die Hoch- und Niederspannungswickelung ist auf Kerne aus Eisenblech aufgeschoben, die an ihren oberen und unteren Enden wiederum durch Blechpakete zu einem vollständigen magnetischen Kreis geschlossen werden.

Um den Spannungsabfall durch Streuung möglichst gering zu machen, sind die Sekundärspulen innen und die Primärspulen konzentrisch darüber angeordnet.

Die Niederspannungswickelung besteht zumeist aus Flachkupferspiralen, die auf starke aus einem Glimmerpräparat (Mikanit) gefertigte

Hülsen aufgeschoben werden, und deren Windungen voneinander isoliert sind. Die Hochspannungswickelung ist aus einer großen Zahl einzelner,

hintereinander geschalteter Spulen zusammengesetzt. Da somit an den Enden der einzelnen Spulen nur mäßige Spannungsunterschiede auftreten, kann ein Durchschlagen der Spulen kaum eintreten; beschädigte Spulen aber können leicht ausgewechselt werden. Die Hochspannungsspulen sind von den Niederspannungsspulen durch vorzügliches Isolationsmaterial getrennt.

Große Transformatoren, deren Abkühlungsverhältnisse wesentlich ungünstigere sind, werden entweder durch künstliche Ventilation oder dadurch gekühlt, daß

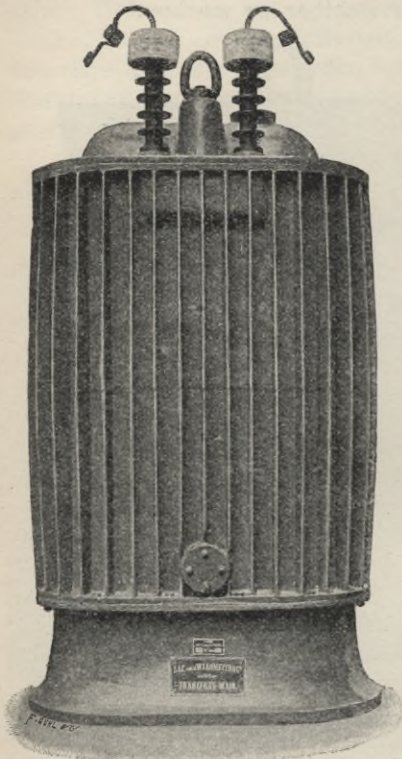


Fig. 255. Hochspannungstransformator in Ölgefäß der Firma E.-A.-G. vormals Lahmeyer.

man sie in Ölgefäße mit äußeren Rippen einsetzt.

Auch für den Gebrauch hoher Spannungen, die neuerdings immer häufiger zur Anwendung kommen, empfiehlt sich die Einbettung der Transformatoren in Öl. Das Öl muß aber

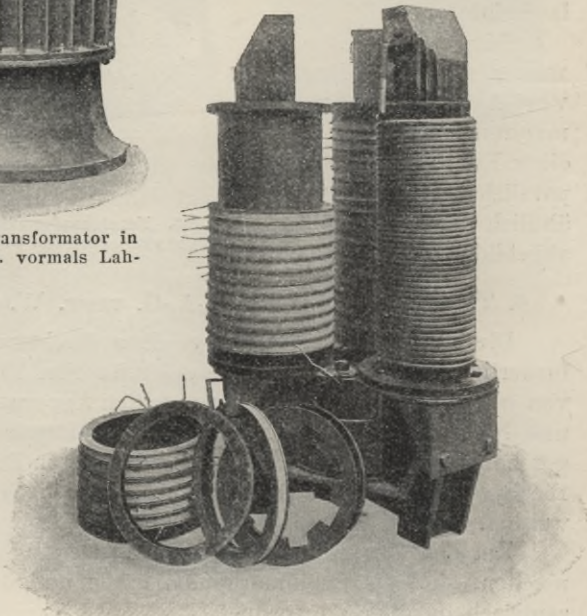


Fig. 254. Teil eines Drehstromtransformators der E.-A.-G. vorm. W. Lahmeyer.

völlig frei von Säure und Feuchtigkeit sein. Da das Öl in die kleinsten Zwischenräume eindringt, findet weniger leicht ein Durchschlagen der Isolation statt, und die statischen Entladungen, durch die allmählich die Isolationsmittel zerstört werden, kommen in Wegfall.

Fig. 255 zeigt das Äußere eines einphasigen Hochspannungstransformators im Ölgefäß.

7. Transformator der Westinghouse Co.

Um auch von der Einrichtung und Ausstattung der Manteltransformatoren eine deutliche Vorstellung zu geben, teilen wir in Fig. 256 die Abbildung einer älteren amerikanischen Konstruktion mit, des Stanley-Westinghouse Transformators, nach Entfernung des gußeisernen Schutzkastens.

Die Eisenbleche werden durch eiserne Rahmen zusammengehalten. Die Wicklung, die oben und unten aus dem Eisenmantel herausragt, ist mit Isolierband umgeben, um eine Beschädigung derselben zu verhindern.

Derartige Transformatoren wurden ehemals bei Verteilungsnetzen mit oberirdischer Stromzuführung mit auf den Masten angebracht, durch welche die Hochspannungsleitungen getragen werden. Diese Apparate befinden sich in gußeisernen Schutzkästen mit abnehmbarem Deckel. Die an die Klemmen der sekundären Wicklung angeschlossenen Verbrauchsleitungen werden von da aus den Verwendungsstellen zugeführt.

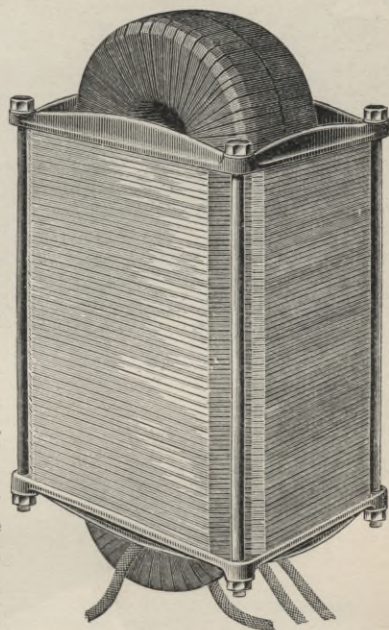


Fig. 256. Älterer Manteltransformator der Westinghouse-Company.

8. Neue Manteltransformatoren Type AWO der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft in Berlin.

Die neuesten Transformatoren der A. E.-G., die als Modell AWO bezeichnet werden (vergl. Fig. 257 a u. b), werden gebaut für Dauerleistungen von 1 bis 50 Kilowatt, für Spannungen bis zu 4000 Volt, bzw. von 7,5 bis 50 Kilowatt Leistung, für Spannungen bis zu 6000 Volt. Die Type bedeutet insofern eine durchgreifende Neuerung den sämtlichen anderen Typen der A. E.-G. gegenüber, als sie nicht

wie diese als Kerntransformator, sondern als Manteltransformator gebaut ist.

Im allgemeinen sind die Mantel-Transformatoren darin den Kern-Transformatoren überlegen, daß sie leicht sehr gedrängt gebaut werden können, wodurch gute elektrische Eigenschaften gewährleistet werden, daß ferner die Bleche nicht von Bolzen durchzogen werden,

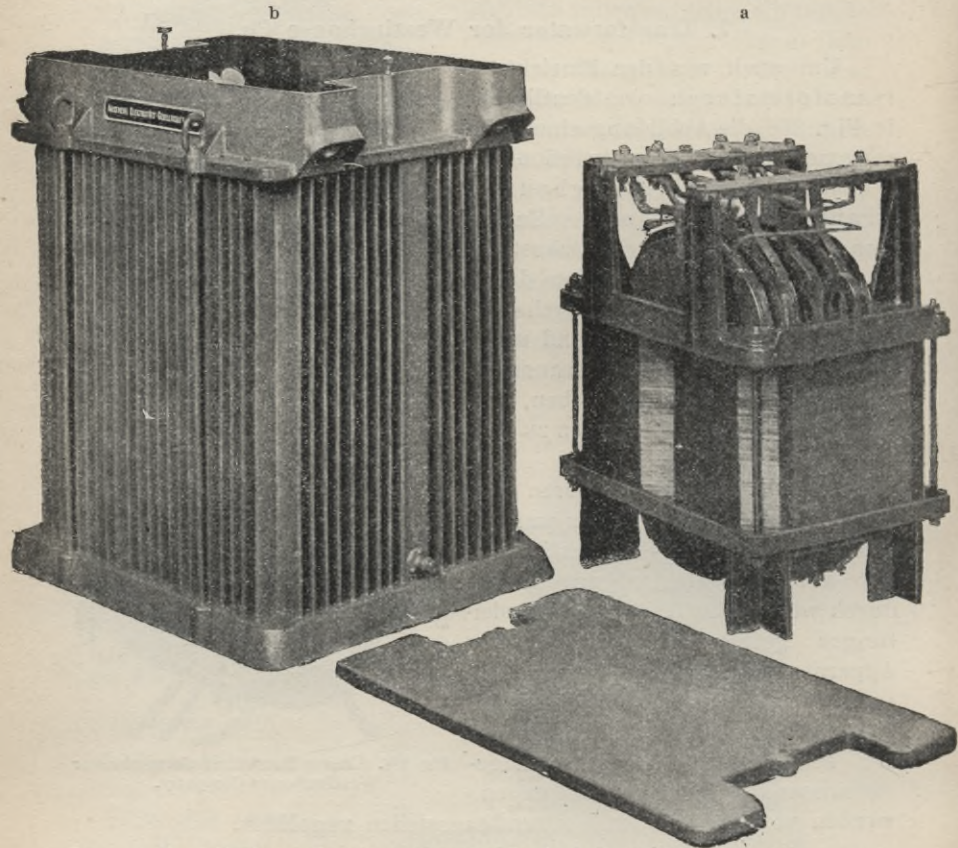


Fig. 257. Neuer Manteltransformator der A. E.-G. in Wellblechkasten.

die etwa Wirbelstromverluste hervorrufen könnten und auch den aktiven Eisenquerschnitt verkleinern, und daß endlich die Spulen durch das Eisengestell selbst gegen mechanische Einwirkungen geschützt sind. Einen weiteren Vorteil, der zwar nicht ausschlaggebend, immerhin aber beachtenswert ist, bildet die gute Kühlung des Eisengestelles. Alledem stehen die Nachteile gegenüber, daß unter sonst gleichen Verhältnissen bei Mantel-Transformatoren die Wickelung nicht so gut gekühlt ist wie bei Kern-Transformatoren, daß der Aufbau

des Eisengestelles sich schwieriger gestaltet, da die Bleche um das fertige Spulenbündel herumgeschichtet werden müssen, und daß aus derselben Ursache vorzunehmende Reparaturen ein vollständiges Ausschichten der Bleche nötig machen.

Diese Nachteile sind jedoch bei kleineren Transformatoren den Vorteilen gegenüber von geringer Bedeutung. Es bereitet bei Leistungen bis zu 50 Kilowatt noch keine besonderen Schwierigkeiten, für ausreichende Kühlung der Wickelung Sorge zu tragen. Der Aufbau des Eisengestelles ist immerhin noch einfach wegen der verhältnismäßig geringen Anzahl der Bleche, und aus demselben Grunde bietet bei einer etwaigen Reparatur das Ausschichten der Bleche keine zu großen Schwierigkeiten.

Für Drehstrom-Transformatoren eignet sich die Manteltype nicht.

Die Transformatoren bis zu 10 Kilowatt Leistung einschließlich stellt die A. E.-G. in gußeisernen Kästen, die größeren von 15 bis zu 50 Kilowatt Leistung in Wellblechgefäßen her (Fig. 257 b).

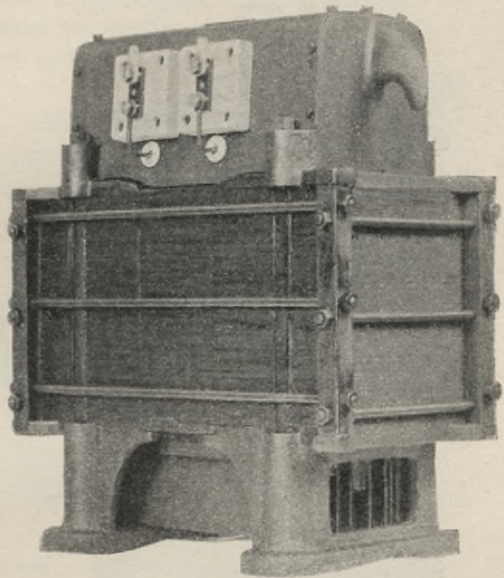


Fig. 258. Manteltransformator der Elektrizitäts-Aktiengesellschaft vorm. Schuckert & Co.

Die Ausführungen können leicht so eingerichtet werden, daß man die Transformatoren ohne Bedenken im Freien aufstellen kann. Kleinere Kästen lassen sich leicht an Masten oder Wänden anbringen.

9. Transformatoren der E.-A.-G. vormals Schuckert & Co.

Die Elektrizitäts-Aktiengesellschaft vormals Schuckert & Co. in Nürnberg verwendet für einphasigen Wechselstrom Manteltransformatoren. Einen derartigen Apparat stellt Fig. 258 dar. Die aus dem Eisenkörper herausragenden Teile der Wickelung sind durch aufgesetzte gußeiserne Hauben vollständig vor Beschädigungen geschützt; auf der oberen Haube ist ein Holzbrett befestigt, das die Klemmen und Bleisicherungen trägt. Durch Schraubenbolzen werden

diese Hauben miteinander verbunden und die Bleche, die den Eisenkörper bilden, zusammengepreßt.

Für Drehstromtransformatoren benutzt die vorgenannte Firma Konstruktionen nach der Kerntype, die den früher beschriebenen und abgebildeten Apparaten dieser Art ähnlich sind. (Vergl. Fig. 259.) Die Wicklungen bestehen aus einer sehr großen Zahl einzelner Spulen, die sorgsam voneinander isoliert und derart angeordnet sind, daß die magnetische Streuung auf einen sehr geringfügigen Betrag zurückgeführt wird.

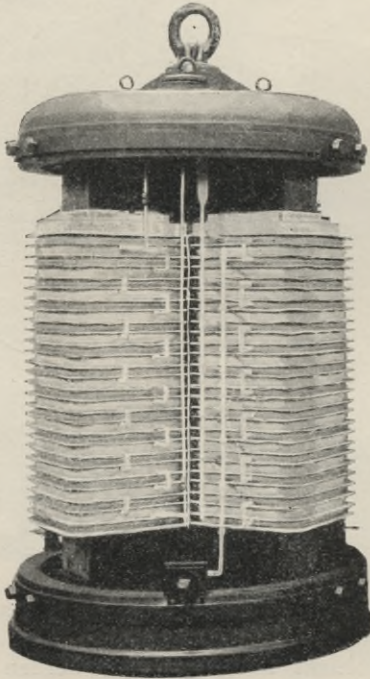


Fig. 259. Drehstromtransformator der Elektrizitäts-Aktiengesellschaft vorm. Schuckert & Co.

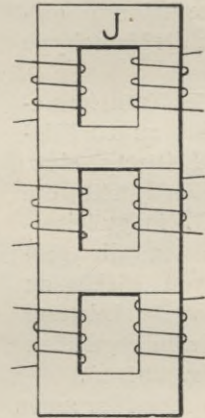
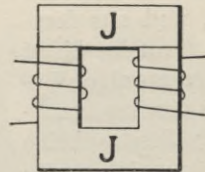


Fig. 260. Ein- u. Dreiphasentransformator der Berliner Maschinenbau-A.-G. vorm. L. Schwartzkopf.

10. Neue Transformatoren der Berliner Maschinenbau-A.-G., vorm. L. Schwartzkopf.

Die Mehrphasentransformatoren der vorgenannten Firma sind aus der Kerntype für einfachen Wechselstrom dadurch hervorgegangen, daß mehrere Kerne aufeinander gesetzt worden sind. Fig. 260 zeigt z. B. aber einen Einphasentransformator und darunter einen Drehstromtransformator in schematischer Darstellung.

Der Vorteil dieser Anordnung ist das geringere Eisengewicht und die dadurch bedingte Verminderung des Eisenverlustes und des Leerlaufstromes. Wenn man, wie das häufig geschieht, für jede der drei Phasen des Drehstromes einen besonderen Einphasentransformator verwendet, kommt nämlich das Jochstück J (Fig. 260) sechsmal vor, während es in der neuen Form nur viermal auftritt.

Ein weiterer Vorzug ist der, daß für Ein- und Mehrphasenapparate gleiche Schnitte für die Eisenscheiben, und gleiche Schablonen für die Spulen und für die sonstigen Ausrüstungsteile verwendet werden können, Fuss- und Deckplatte auch bei Mehrphasenapparaten nur je einmal nötig sind. Die Kosten der fabrikmäßigen Herstellung werden dadurch verringert.

Fig. 261 zeigt beispielsweise einen Transformator für Wechselstrom, Fig. 262 einen solchen für Drehstrom.

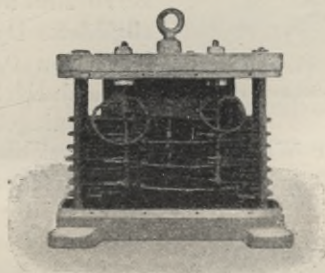


Fig. 261.
Einphasentransformator
der Berliner Maschinenbau-A.-G. vorm. L. Schwartzkopf.

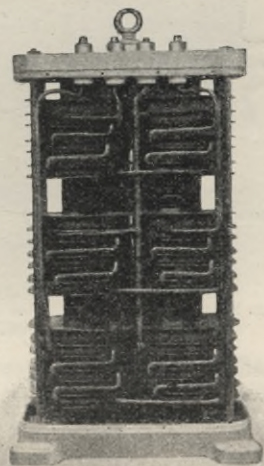


Fig. 262.
Drehstromtransformator
der Berliner Maschinenbau-A.-G. vorm. L. Schwartzkopf.

Auch die Abkühlungsflächen der Eisenkerne und der Spulen sind bei diesen Apparaten verhältnismäßig größer; man wird daher für eine gleiche zulässige Temperaturerhöhung derartige Transformatoren etwas stärker belasten, Eisen und Kupfer etwas stärker beanspruchen können.

Da derartige Mehrphasentransformatoren verhältnismäßig hoch und schlank ausfallen, beanspruchen sie geringe Bodenfläche und lassen sich leicht in säulenartigen Schutzgehäusen unterbringen. Auch hinsichtlich der Unabhängigkeit der magnetischen Kraftflüsse der einzelnen Phasen voneinander und hinsichtlich der Streuungsverhältnisse verhalten sich diese Apparate nicht ungünstiger als andere Konstruktionen.

11. Manteltransformatoren der Siemens-Schuckert Werke.

Die Bauart der Einphasentransformatoren (vergl. Fig. 263) mit der Modellbezeichnung Em (E Einphasen, m Mantel) unterscheidet

sich im Prinzip nicht wesentlich von den vorher beschriebenen Manteltransformatoren. Durch starke Unterteilung der Wicklung (vgl. S. 304) wird die Streuung sehr niedrig gehalten. Für die Isolation sind besonders zubereitete Materialien verwendet. Die Eisenkerne sind aus vorzüglichem Dynamo-blech von 0,3 mm Dicke, durch Papierzwischenlagen von

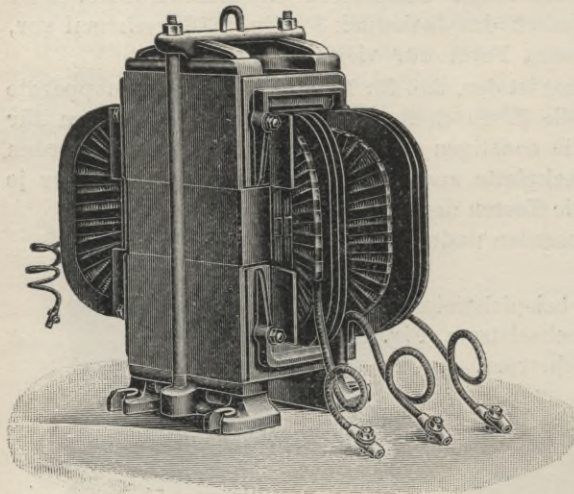


Fig. 263. Manteltransformator der Siemens-Schuckertwerke (Modell Em).

einander isoliert, hergestellt. Für Wärmeabgabe ist reichlich gesorgt, sodaß die Selbstkühlung völlig genügt, um die Temperatur-

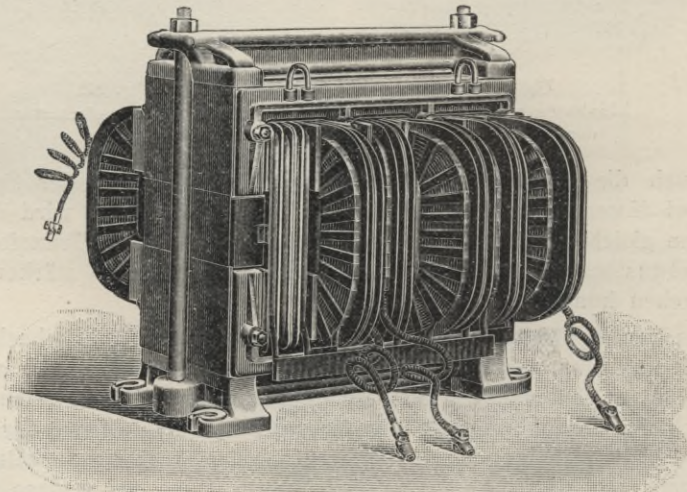


Fig. 264. Manteltransformator der Siemens-Schuckertwerke (Modell Dm).

verhältnisse in den vom Verband Deutscher Elektrotechniker festgesetzten Grenzen zu halten.

Einen wesentlichen Unterschied von anderen Mehrphasentransformatoren weisen aber die Drehstromtransformatoren Modell Dm, (Fig. 264) (D Drehstrom, m Manteltype) insofern auf, als die den drei Phasen entsprechenden Wickelungsgruppen in einer Achse nebeneinander gelagert, auf einem durchgehenden rechteckigen Eisenkern aufgereiht sind.¹⁾ Durch zwei seitliche Eisenkörper mit doppelter Querverbindung werden die Kraftlinien geschlossen.

Die Eisenbleche sind so angeordnet, daß ein Schnitt in Richtung der Lamellierung überall Eisenumhüllung der Spulen ergibt.

Der übrige Aufbau der Transformatoren ist aus den beigegeführten Abbildungen (Fig. 263 und Fig. 264) vollständig ersichtlich.

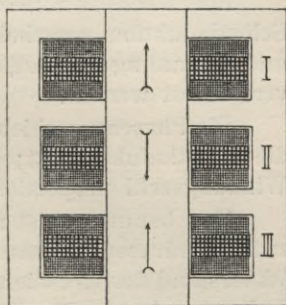


Fig. 265. Drehstromtransformator der Manteltype der Siemens-Schuckert-Werke.

12. Drosselspulen und Transformatoren mit offenem magnetischen Kreise.

Die Vorschaltung oder Parallelschaltung induktiver Widerstände bietet bei der Anwendung von Wechselströmen eine so wesentliche Ersparnis an Energie im Vergleiche zum Gebrauche induktionsloser Widerstände, daß man zumeist in Wechselstromanlagen an Stelle der Beruhigungswiderstände vor Bogenlampen oder bei hintereinander geschalteten Lampen an Stelle von mechanischen Kurzschlußeinrichtungen zu den Lampen parallel geschaltete Widerstände mit Selbstinduktion mit großem Vorteile verwendet.²⁾

Man faßt solche Einrichtungen unter dem Namen Drosselspulen zusammen.

Da bei der Ermittlung ihrer Abmessungen ähnliche Gesichtspunkte in Frage kommen, wie bei der Vorherberechnung der Transformatoren, so wollen wir dieselben hier kurz mit betrachten.

Bekanntlich brennen Bogenlampen nur dann ganz ruhig, wenn sie mit einer merklich erhöhten Spannung betrieben werden, und der über die Lampenspannung hinausgehende Teil der Spannung auf andere Weise durch vorgeschaltete Widerstände oder in Glühlampen verbraucht wird. (Vergl. Gleichstromtechnik, Kap. III, 8, S. 63.)

¹⁾ D. R. P. No. 93 254 (1895).

²⁾ Man vergl. auch Kap. 2, Abschn. 7, S. 40 u. f.

Bei vorgeschalteten induktionsfreien Widerständen ist der hierdurch entstehende Energieverlust gleich dem Produkte aus Stromstärke und der im Widerstande verbrauchten Spannung.

Bei Wechselströmen macht sich, wenn man Widerstände mit Selbstinduktion vorschaltet, die Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung geltend, und der verbrauchte Effekt kann erheblich vermindert werden.

Die Phasenverschiebung wird um so erheblicher sein, je stärker die Selbstinduktion ist; diese ist aber bekanntlich dem Quadrate der Windungszahl proportional. (Vergl. Kap. 2, 2., S. 29.)

Man benutzt meist magnetische Stromkreise mit erheblichen Luftzwischenräumen. Dann kann ohne großen Fehler der magnetische Widerstand des Kraftlinienweges im Eisen gegen den Widerstand dieses Luftweges in einer ersten Annäherung vernachlässigt werden, weil die Permeabilität der Luft ($\mu = 1$) ja 1000 bis 2000 mal geringer als die des Eisens ist.

13. Drosselspulen mit Lampen in Hintereinanderschaltung.

Wir wollen die Behandlung eines solchen Falles an einem Beispiele dartun.

In einem Wechselstromkreise von 50 Volt und 50 Perioden soll eine Bogenlampe von 12 Ampère betrieben werden. Dann fordert die Lampe etwa 30 Volt Klemmenspannung. Wollte man die 20 Volt in einem gewöhnlichen, induktionsfreien Vorschaltwiderstand verbrauchen, so würden $20 \cdot 12 = 240$ Watt in jeder Sekunde nutzlos in Wärme umgewandelt werden. Schaltet man aber statt desselben eine Drosselspule ein, so ist, wie wir schon früher (Kap. 2, Abschn. 8., S. 44) gezeigt haben, der Energieverlust viel geringer.

Die Spannung an den Enden der Spule müßte

$$\sqrt{50^2 - 30^2} = 40 \text{ Volt}$$

sein. Mit Rücksicht auf den Spannungsverlust in der Bewickelung wollen wir 37 Volt annehmen. Wir wählen den in Fig. 266 abgebildeten, aus isolierten Blechen hergestellten Eisenkern, machen

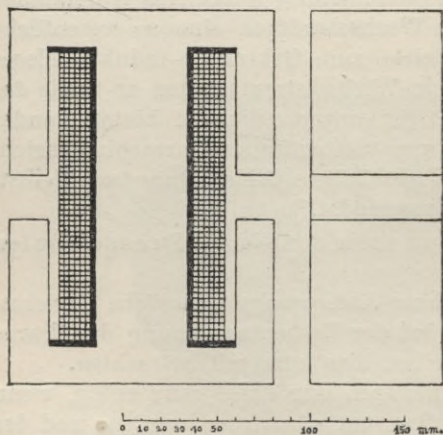


Fig. 266. Schematische Darstellung einer Drosselspule.

den Schlitz 7,5 *cm* breit und wählen die Induktion $\mathfrak{B} = 4000$ Kraftlinien für 1 *qcm*.

Der Querschnitt des in der Spule enthaltenen Eisenkörpers ($\frac{1}{10}$ für die Papierzwischenlagen abgerechnet) ist:

$$f_1 = 0,9 \times 7 \times 4,8 = 30 \text{ qcm.}$$

Dann ist die Kraftlinienzahl $\Phi = 4000 \cdot 30 = 120000$ Linien.

Nunmehr ermitteln wir die Anzahl der erforderlichen Windungen. Nach der Gleichung (S. 29, Formel 13)

$$e = 4,44 \sim \Phi \cdot n \cdot 10^{-8}$$

ergibt sich die Zahl der erforderlichen Windungen zu:

$$n = \frac{e}{4,44 \sim \Phi \cdot 10^{-8}} = \frac{37}{4,44 \cdot 50 \cdot 120000 \cdot 10^{-8}} = 1162.$$

Der Strom kann ermittelt werden aus der magnetomotorischen Kraft, diese aus der Kraftlinienzahl und dem magnetischen Widerstande.

Der magnetische Widerstand w der Luftschicht ist:

$$w = \frac{\delta}{f}.$$

Für f setzen wir, weil nicht nur die Oberfläche des Schlitzes an der Aussendung von Kraftlinien teilnimmt,

$$f = f' + \frac{\delta \cdot b}{2},$$

wo f' der Inhalt einer Endfläche eines Lappens und b die Breite des Schlitzes ist.

Es ist nun $f' = 7 \cdot 2 \cdot 0,9 = 12,6$ *qcm*, folglich:

$$f = 12,6 + \frac{7,5 \cdot 7}{2} = 38,8 \text{ qcm}$$

und

$$w = \frac{7,5}{38,8} = 0,2.$$

Die magnetomotorische Kraft M muß dann sein:

$$M = \Phi \cdot w = 120000 \cdot 0,2 = 24000$$

und daraus die Stromstärke

$$J_0 = \frac{0,8 \cdot 24000}{\sqrt{2} \cdot 1162} = 11,7 \text{ Ampère.}$$

Da wir den Spannungsverlust in der Spule zu 3 Volt angenommen haben, muß der Verlust im Kupfer rund: $11,7 \times 3 = 35$ Watt betragen.

Hierzu kommt noch der Verlust im Eisenkörper. Das Volumen desselben beträgt ungefähr 1150 *ccm*, sein Gewicht somit

$$\frac{1150 \cdot 8}{1000} = 9,2 \text{ kg.}$$

Nach dem auf S. 118, Fig. 78, dargestellten Diagramm beträgt bei 50 Perioden für $\mathfrak{B} = 4000$ der Verlust in 1 *cbdm* Eisen 10 Watt. Der Verlust im Eisen ist demnach $1,15 \times 0,8 \times 10 = 9,2$ Watt.

Der Gesamtverlust in der Drosselspule beträgt somit nur $35 + 9,2 = 44$ Watt, demnach wenig mehr als $\frac{1}{6}$ von dem, den wir erhalten hätten (240 Watt), wenn ein induktionsfreier Vorschaltwiderstand angewendet worden wäre.

14. Drosselspulen parallel zu den Lampen.

Wir wählen dazu als Beispiel eine 25kerzige Glühlampe, die bei 23,5 Volt Spannung 80 Watt verbraucht.¹⁾ Die Periodenzahl des Wechselstromes sei wieder 50.

Parallel zur Lampe sei eine Drosselspule geschaltet, die denselben Eisenkörper besitzt, den wir vorher verwendet haben. (Vergl. Fig. 248.)

Die Induktion im Eisenkörper wählen wir zunächst gering $B = 600$. Dann ist die Kraftlinienzahl 18000.

Hieraus folgt die Windungszahl

$$n = \frac{23,5}{4,44 \cdot 50 \cdot 18000 \cdot 10^{-8}} = 588.$$

Die magnetomotorische Kraft M ist:

$$M = \Phi \cdot w = 18000 \cdot 0,2 = 3600.$$

Der Magnetisierungsstrom in der Wickelung ist demnach:

$$J_M = \frac{0,8 \times 3600}{\sqrt{2} \times 588} = 3,46 \text{ Ampère.}$$

Rechnen wir den Gesamtverlust in Spulenwicklung und Kern zu 20 Watt, so ist bei 23,5 Volt der hierzu nötige Gesamtnutzstrom, dessen Phase mit der EMK zusammenfällt,

$$J_N = \frac{80 + 20}{23,5} = 4,3 \text{ Ampère.}$$

Der Gesamtstrom J wäre somit:

$$J = \sqrt{3,5^2 + 4,3^2} = 5,5 \text{ Ampère.}$$

Platzt nun der Kohlenfaden, so fließt der Gesamtstrom von 5,5 Ampère ausschließlich durch die Windungen der Drosselspule und erzeugt eine magnetomotorische Kraft von

$$M = \frac{4\pi}{10} \cdot 5,5 \cdot \sqrt{2} \cdot 588 = 5750$$

einen Kraftlinienstrom Φ

$$\Phi = \frac{M}{w} = \frac{5750}{0,2} = 28750$$

¹⁾ Dieses Beispiel entnehmen wir Feldmann, Transformatoren, S. 502. Man vergl. auch Kap. 2, Abschn. 9, S. 45.

und eine EMK

$$E = 4,44 \times 50 \times 588 \times 28750 \times 10^{-8} = 37,5 \text{ Volt.}$$

Anstatt 23,5 Volt verbraucht somit nunmehr die Drosselspule 37,5 Volt, und dieser Mehrverbrauch wird, wenn viele Lampen hintereinander geschaltet sind, nur wenig merkbar sein.

Die Drosselspule konsumiert, solange sie einen Nebenschluß zur Lampe bildet, eine fast verschwindende Energiemenge und verhindert, wenn die Lampe erlischt, eine Stromunterbrechung.

15. Abzweigtransformatoren.

Wenn es sich darum handelt kleine Gruppen von Lampen mit niedrigen Spannungen an Wechselstromleitungen anzuschließen, die für höhere Spannungen bestimmt sind, benutzt man vielfach Einrichtungen, die keiner der bisher besprochenen Anordnungen völlig entsprechen, nämlich sogenannte Abzweigtransformatoren. Besonders seitdem die Osmiumlampen mehr und mehr Verwendung finden, die zunächst nur für 37 bis 40 Volt Klemmenspannung hergestellt werden können, haben derartige Apparate eine größere praktische Bedeutung gewonnen. Man vermeidet auf diese Weise das Hintereinanderschalten von Lampen, was als Auskunftsmittel außerdem nur so lange anwendbar ist, als alle Lampen für gleiche Stromstärke bestimmt sind.

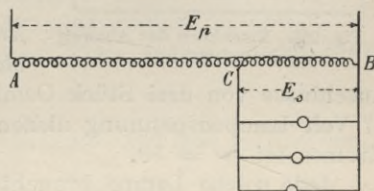


Fig. 267. Abzweigtransformator für den Anschluß niedervoltiger Glühlampen an Wechselstromleitungen, die mit höherer Spannung betrieben werden.

Solche Abzweigtransformatoren sind induktive Widerstände, von welchen an passenden Punkten, zwischen denen die für die Lampen erforderliche Spannung herrscht, abgezweigt wird.¹⁾ Selbstverständlich muß man, um nicht einen dauernden Stromverlust zu haben, die Stromzuleitung zu einem solchen Abzweigtransformator unterbrechen, wenn die Lampen nicht brennen sollen.

Herrscht zwischen zwei Punkten A und B die primäre Verteilungsspannung E_p , und sollen Lampen mit einer niedrigeren Spannung E_s gespeist werden, so wählt man den Punkt C auf dem induktiven Widerstande so, daß zwischen B und C die Lampenspannung herrscht. (Vergl. Fig. 267).

Fast alle Abzweigtransformatoren besitzen Eisenkerne von der in Fig. 268 abgebildeten Form mit quadratischem Querschnitte.

¹⁾ Ursprünglich hatte sich im Jahre 1899 Hicks diese Schaltung patentieren lassen; das Patent ist aber inzwischen erloschen.

Für die Dimensionen des Fensters a und b kann man ein beliebiges Verhältnis annehmen.

Nennt man die Länge des mittleren Kraftlinienweges l_m und die Seitenlänge des quadratischen Querschnittes h, so ist das Volumen des Eisens:

$$V = h^2 \cdot l_m \cdot 0,9.$$

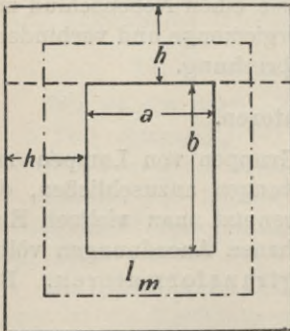


Fig. 268. Eisenkern des Abzweigtransformators.

Der Faktor 0,9 bezieht sich auf die Verringerung des Eisenquerschnittes durch die isolierenden Zwischenlagen.

Die Kernoberfläche O ist:

$$O = 4 h \cdot l_m.$$

Ferner ergibt sich sofort:

$$h = 4,44 \frac{V}{O} \quad l_m = \frac{O}{4 h}$$

$$\text{und } a + b = \frac{l_m - 4 h}{2}.$$

Wir wollen einen solchen kleinen Abzweigtransformator berechnen, der bei 110 Volt Verteilungsspannung zum Anschlusse von drei Stück Osmiumlampen zu 25 Normalkerzen und 37 Volt Lampenspannung dienen soll. Die Periodenzahl des Wechselstromes sei $\sim = 50$.

Jede solche Lampe braucht 1,1 Ampère Strom, demnach muß die Leitung für 3,3 Ampère bemessen werden. Die Belastung beträgt $3,3 \cdot 37 = 122 \text{ Watt} = \frac{1}{8} \text{ Kilowatt}$.

Die Bewickelungen solcher Abzweigtransformatoren betragen erfahrungsmäßig für 120 Volt etwa:

Belastung mit	0,1	bis	0,5	Kilowatt	600	bis	220	Windungen
	0,5	»	1,0	»	220	»	180	»
	1	»	2	»	180	»	150	»
	2	»	3	»	150	»	130	»

Wir wählen demnach für $\frac{1}{8}$ Kilowatt etwa 500 Windungen.

Für die magnetische Induktion im Eisen wollen wir $\mathfrak{B}_{\max} = 8000$ ansetzen.

Dann kann man den Eisenquerschnitt O bestimmen und erhält nach Formel 49)

$$Q = \frac{\varepsilon_p \cdot 10^8}{4,44 \cdot \mathfrak{B}_{\max} \cdot \sim \cdot n} = \frac{110 \cdot 10^8}{4,44 \cdot 8000 \cdot 50 \cdot 500} = 12,5 \text{ qcm.}$$

Der Querschnitt wird wegen der Papierzwischenlagen im Verhältnis von 0,9 : 1 größer, wird somit:

$$Q' = \frac{12,5}{0,9} = 14 \text{ qcm} = 1400 \text{ qmm.}$$

Daraus folgt die Länge der Quadratseite h :

$$h = \sqrt{1400} = 38 \text{ mm.}$$

Will man die Wickelung nicht viel höher als mit 2 bis 3 Ampère für 1 *qmm* belasten, so muß man für 3,3 Ampère Draht von 1,5 *mm* Dicke mit 1,77 *qmm* Querschnitt wählen. Durch die Umspinnung wird solcher Draht 1,7 *mm* dick.

Ordnet man die Wickelung in zwei Spulen und legt 28 Windungen nebeneinander, so erhält man $500 : (28 \times 2) = 9$ Schichten übereinander. Wickelt man alle Lagen voll, so erhält man $28 \times 2 \times 9 = 504$ Windungen, was von der angenommenen Zahl 500 nur unerheblich abweicht.

Die Abzweigung führt man dann bei $504 : 3 = 168$ Windungen aus, nimmt also auf jede der beiden Spulen 84 Windungen.

Für die Abzweigung wählt man, um die Streuung möglichst klein zu machen, die 3 innersten Lagen von je 28 Windungen.

Für 9 Lagen sind $9 \times 1,7 = 16 \text{ mm}$ nötig. Man wird, um für Isolationschichten und Luftzwischenraum zwischen beiden Spulen genügend Platz zu haben, etwa $a = 40 \text{ mm}$ wählen.

Damit 28 Windungen nebeneinander Platz haben, macht man $b = 28 \cdot 1,7 = 50 \text{ mm}$.

Daraus ergibt sich:

$$l_m = 2a + 2b + 4h = 80 + 100 + 152 = 332 \text{ mm} = 33,2 \text{ cm.}$$

Dadurch wird das Eisenvolumen:

$$V = 3,8^2 \cdot 33,2 \cdot 0,9 = 431 \text{ cbcm}$$

und die Oberfläche O :

$$O = 4 \cdot 3,8 \cdot 33,2 = 505 \text{ qcm.}$$

Für die mittlere Länge einer Windung findet man auf bekannte Weise 18 *cm*. Die Gesamtdrahtlänge beträgt somit:

$$504 \times 18 = 9072 \text{ cm} = 91 \text{ m.}$$

Die Länge des abgezweigten Teiles ist:

$$18 \times 168 = 3050 \text{ cm} = 30,5 \text{ m,}$$

die des unverzweigten somit: $91 - 30,5 = 60,5 \text{ m}$.

Auf die Durchführung der Verlustrechnung verzichten wir, da die Berechnung der Stromstärken sich ziemlich umständlich gestalten würde, und teilen nur mit, daß sich der Wirkungsgrad eines solchen kleinen Abzweigtransformators zu etwa 92% herausstellt.

16. Sicherheitsmaßregeln beim Gebrauche von Transformatoren.

Da die primären und sekundären Wickelungen eines Transformators durch isolierende Zwischenschichten getrennte Leiter sind, die erhebliche Spannungsunterschiede besitzen, werden zwischen denselben elektrostatische Ladungserscheinungen auftreten, wie bei einer Leydener Flasche.

Es erscheint nicht ausgeschlossen, daß unter ungünstigen Umständen die Isolation zwischen der primären und sekundären Wicklung durchbrochen wird, und dann Ströme von lebensgefährlich hohen Spannungen in die zugänglichen Gebrauchsleitungen eintreten. Man hat daher verschiedene Einrichtungen ausgedacht, durch welche diese Gefahr vermindert oder ausgeschlossen wird.

Einige Gefahren, zumal solche, die durch atmosphärisch-elektrische Entladungen veranlaßt werden, können auch dadurch beseitigt werden, daß man das Eisengestell der Transformatoren mit der Erde (z. B. mit dem Blitzableiter, Wasserleitungsrohren usw.) leitend verbindet. Bei Sternschaltung von Drehstromtransformatorenwickelungen kann auch der neutrale Punkt geerdet werden.

Es ist aber ohne weiteres einzusehen, daß eine solche Erdung nicht unter allen Umständen einen zuverlässigen Schutz gewährt. Viele Ingenieure verwerfen daher dieses Verfahren vollständig.

Man ordnet ferner zwischen den beiden Wickelungen ein von denselben isoliertes Kupferblech an und verbindet dieses mit der Erde; oder man legt nach einem Vorschlage von Kapp die Mitte der sekundären Spule an Erde. Tritt durch eine Verletzung der Isolation der hochgespannte Strom aus, so wird er im ersten Falle durch die leitende Zwischenschicht, im zweiten Falle unmittelbar zur Erde abgeleitet, und damit die Gefahr beseitigt.

Da durch dauernde Erdung eines Punktes der Niederspannungswicklung jedoch leicht Störungen in benachbarten Telephonleitungen, bei welchen die Erde als Rückleitung verwendet wird, veranlaßt werden, legen Siemens & Halske in die Erdleitung eine Spannungssicherung.

Es ist dies eine äußerst kurze Funkenstrecke (von etwa $0,1\text{ mm}$), die von Strömen geringer Spannung, wie sie zumeist in den Gebrauchsleitungen auftreten, nicht überbrückt wird, die aber sofort unter Funkenbildung übersprungen wird, sowie die Spannung etwa den dreifachen Betrag der normalen erreicht.

Diese Spannungssicherungen sind Porzellanhülsen, in welchen zwei Metallstücke, nur getrennt durch ein sehr dünnes und an mehreren Stellen durchlochstes Glimmerblättchen, sich äußerst nahe gegenüber stehen. Das eine dieser Metallstücke ist mit der Mitte der Niederspannungswicklung, das andere mit der Erde leitend verbunden.¹⁾

Es kann außerdem mit dieser Spannungssicherung noch eine Alarmglocke verbunden werden, die durch ein Relais betätigt wird, sowie Strom in die Erde übergeht.

Ferranti verbindet die Lampenleitungen durch die hintereinander geschaltete Primärwickelung zweier kleiner Transformatoren, deren

¹⁾ Näheres über die Einrichtung dieser Spannungssicherungen teilt G ö r g e s, ETZ 1901, S. 310 mit.

Sekundärwickelungen parallel geschaltet und durch einen Abschmelzdraht verbunden sind. Der Abschmelzdraht hält einen federnden Ausschalter zurück.

Solange die Isolation überall tadellos ist, fließt durch beide primären Spulen der Hilfstransformatoren derselbe Strom; die in den Sekundärwickelungen induzierten EMKräfte halten sich das Gleichgewicht und es fließt durch den Abschmelzdraht kein Strom.

Die Verbindung der beiden Primärspulen ist an Erde gelegt, daher wird dieses Gleichgewicht sofort gestört, sowie ein Isolationsfehler entsteht. Der Sicherheitsdraht schmilzt, der Ausschalter fällt zu, schließt die Lampenleitung kurz und legt sie an Erde.

Dadurch ist jede Gefahr beseitigt. Gleichzeitig schmelzen wegen der plötzlichen Zunahme des Sekundär- und Primärstromes im Haupttransformator die Bleisicherungen zwischen der Hochspannungsleitung und der primären Wickelung und schalten damit den beschädigten Transformator selbsttätig aus.

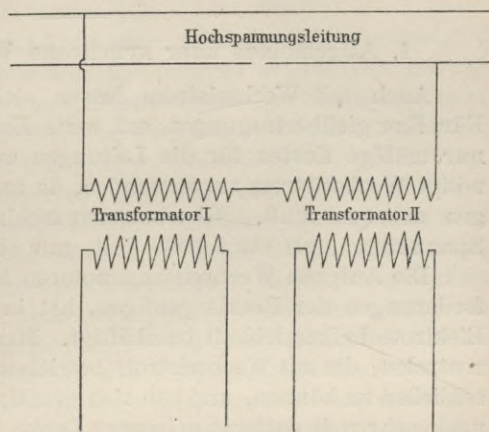


Fig. 269. Die Erwärmung eines neueinzuschaltenden Transformators.

Die Hauptgefahr für eine Verletzung der Isolation infolge Durchschlagens liegt vor, wenn ein neuer Transformator an die Hauptleitung angeschlossen wird. Um die Isolation gut zu machen, besonders um die etwa vorhandene Luftfeuchtigkeit zu entfernen, wärmt man daher den Transformator erst ungefähr 24 Stunden lang sorgfältig an, ehe man ihn mit voller Spannung beansprucht.

Es geschieht dies am besten dadurch, daß man, nachdem der Transformator angeschlossen worden ist, längere Zeit die Strom erzeugenden Maschinen mit halber Geschwindigkeit laufen läßt, oder, wenn dies nicht zugänglich ist, daß man die primäre Wickelung des neu einzuschaltenden Transformators zunächst hinter die primäre Wickelung eines anderen Transformators schaltet. (Vergl. Fig. 269.)

Wenn irgend möglich, soll späterhin der Transformator gar nicht wieder vom Hochspannungsnetz losgelöst werden, damit er, auch wenn er nicht belastet ist, infolge der Magnetisierungsarbeit immer eine höhere Temperatur beibehält, und keine Feuchtigkeit in die Zwischenräume der Wickelungen eindringen kann.

19. Kapitel.

Synchronmotoren für einphasigen und mehrphasigen Wechselstrom.

1. Allgemeines über synchrone Wechselstrommotoren.

Auch mit Wechselstrom lassen sich Elektromotoren betreiben. Für Energieübertragungen auf weite Entfernungen, bei denen man nur mäßige Kosten für die Leitungen aufwenden will, ist man genötigt Wechselstrom zu verwenden, da man dann mit hohen Spannungen arbeiten muß. Gleichstrommaschinen lassen sich für höhere Spannungen, als etwa 1000 Volt, nur schwierig herstellen.

Die Aufgabe Wechselstrommotoren zu konstruieren, die den Anforderungen der Praxis genügen, hat in den letzten Jahrzehnten die Elektrotechniker lebhaft beschäftigt. Man wünschte an Beleuchtungszentralen, die mit Wechselstrom betrieben werden, Elektromotoren anschließen zu können, und sah sich genötigt, für Energieübertragungen nach sehr weit entfernt gelegenen Orten, aus den soeben angegebenen Ursachen Wechselstrom in Aussicht zu nehmen, wenn Gründe vorlagen, auf den Gebrauch von Drehstrom zu verzichten.

Jede Gleichstrommaschine für Reihenschaltung (Hauptstrommaschine), sowie jede Nebenschlußmaschine kann mit Wechselstrom in Gang gesetzt und betrieben werden, wenn nur ihre Feldmagnete zur Verhütung von Wirbelströmen aus einzelnen voneinander isolierten Eisenblättern hergestellt werden. Da sowohl die Stromrichtung im Anker, als die Polarität der Feldmagnete sich gleichzeitig bei jedem Richtungswechsel des Stromes umkehren, behält die Drehrichtung des Ankers ihren Sinn bei. Solche Motoren gehen auch von selbst an.

Wegen der bedeutenden Hysteresisverluste in den Eisenteilen der Maschine, und wegen der großen Selbstinduktion ist aber der Wirkungsgrad von Wechselstrommotoren, die nach Art der Gleichstrommaschinen gebaut sind, gering, sodaß höchstens für ganz kleine Leistungen an ihre praktische Verwendung gedacht werden kann.

Es kann ferner auch jede Wechselstrommaschine als Motor laufen und dabei mit gutem Wirkungsgrade arbeiten; der Nachteil ist jedoch der, daß diese Maschinen nicht von selbst angehen, und deshalb besondere Anlaßvorrichtungen vorgesehen werden müssen. Solche

Maschinen müssen erst in Gang gesetzt werden, und ihre Feldmagnete müssen durch eine besondere Stromquelle oder durch gleichgerichteten Wechselstrom erregt werden. Sowie allerdings ein solcher Motor nahezu die Geschwindigkeit erreicht hat, bei der er Wechselströme von gleicher Periode liefern würde, bewirkt der zugeführte Strom rasch einen völligen Ausgleich etwa noch vorhandener Unterschiede (synchronisierende Tendenz), und Generator und Motor laufen von da an in völlig gleichem Takte. Man nennt solche in gleichem Takte laufende Maschinen *synchrone*. Eine als Motor laufende gewöhnliche Wechselstrom- oder Drehstrommaschine ist daher ein *Synchronmotor*.

Ein besonderer Übelstand ist der, daß für die Erregung des Magnetfeldes des Synchronmotors Gleichstrom erforderlich ist. Man muß also entweder eine Akkumulatorenbatterie zur Verfügung haben, oder es muß mit dem Motor eine Gleichstrommaschine verbunden werden, die den erforderlichen Strom liefert.

Gewöhnlich verfährt man so, daß man auf der Welle der als Motor laufenden Wechselstrommaschine den Anker einer kleinen Gleichstrommaschine anbringt und den Strom dieser Hilfsmaschine sowohl zum Erregen der Feldmagnete, als auch zum Laden einer Akkumulatorenbatterie verwendet. Beim Inangangsetzen des Wechselstrommotors liefert dann die Akkumulatorenbatterie den erforderlichen Strom, und die Gleichstrommaschine kann von der Batterie aus für kürzere Zeit als Gleichstrommotor in Tätigkeit gesetzt werden, um den beweglichen Teil der selbstverständlich unbelasteten Wechselstrommaschine auf die zur Herstellung des Synchronismus erforderliche Umlaufzahl zu bringen.

Sowie der Synchronismus erreicht ist, kann die Belastung aufgelegt werden.

Man erkennt aus all diesen Betrachtungen, daß *synchrone Wechselstrommotoren* mit Belastung nicht angehen und nur mit einer ganz bestimmten Umlaufzahl, die gerade dem Synchronismus entspricht, laufen können.

Übersteigt die Belastung einen gewissen Höchstwert, so erniedrigt sich die Umlaufzahl des Synchronmotors; derselbe kommt dadurch aus dem Synchronismus und bleibt stehen.

Um *synchrone Wechselstrommotoren* herzustellen, die von selbst angehen, sind verschiedene Kunstgriffe vorgeschlagen und in Anwendung gebracht worden.

Man kann z. B. Anker- und Feldwicklung hintereinander schalten und den Motor als Serien- oder Hauptstrommaschine anlaufen lassen.

Am zweckmäßigsten scheint man es jedoch gefunden zu haben, die Maschinen als *Zweiphasenmotoren* anlaufen zu lassen und dann,

nachdem der Synchronismus erreicht ist, die zweite Phase, die sogenannte Hilfsphase oder Kunstphase, in Wegfall zu bringen.

Um einen Motor, der durch zwei Drähte mit einphasigem Wechselstrom gespeist wird, mit zwei in der Phase gegeneinander verschobenen Wechselströmen angehen zu lassen, können verschiedene Hilfsmittel zur Anwendung gebracht werden. Man versieht den Motor mit einer zweiten Wickelung, die von einem abgezweigten Teile des Hauptstromes durchflossen wird; diese Hilfswickelung kann, weil sie nur kurze Zeit in Tätigkeit bleibt, aus Draht von geringerem Querschnitte hergestellt werden. Dadurch, daß man z. B. dem diese Wickelung durchfließenden Strome eine von der Hauptwickelung verschiedene Selbstinduktion gibt und sie der ersten parallel schaltet, entsteht infolge der Phasenverschiebung (Vergl. Kap. 2, 6, S. 36) ein magnetisches Drehfeld, durch das der Motor zum Angehen gebracht wird. Ist der Synchronismus erreicht, so unterbricht man die Hilfswickelung und der Motor läuft nun synchron weiter.

Die Phasenverschiebung in dieser zweiten Wickelung kann auf verschiedene Weise herbeigeführt werden. Man kann die Hauptwickelung z. B. als Trommelwickelung, die Hilfswickelung aber ähnlich ausführen wie die Wickelung eines Grammeringes; dann besitzt letztere im allgemeinen eine wesentlich größere Selbstinduktion als die erstere. In einem späteren Kapitel sind eine Anzahl Schaltungen beschrieben, besonders auch die Görgessche Brückenschaltung, durch die Phasenverschiebungen der Hilfsphase um 90° bewerkstelligt werden können.

Man kann ferner in den Nebenschluß, der durch die Hilfswickelung gebildet wird, die Windungen eines Wechselstromelektromagneten, eine Drosselspule, einschalten und dadurch eine große Selbstinduktion einführen, oder man kann die eine Wickelung von einem Transformator aus speisen, dessen primäre Wickelung von einem Teile des Hauptstromes durchlaufen wird.

Endlich kann man eine Phasenverschiebung in entgegengesetztem Sinne dadurch bewerkstelligen, daß man parallel einer Wickelung eine Kapazität schaltet. (Vergl. Kap. 4, 3, S. 60). Für letzteren Zweck eignen sich besonders Zersetzungszellen mit großer Oberfläche, die man dadurch erhält, daß man übereinander eine große Zahl konischer Eisenbleche anordnet, die man durch isolierende Zwischenschichten voneinander getrennt erhält, und deren Zwischenraum mit einer Lösung von Soda in Wasser gefüllt ist.

In Fig. 270 ist eine solche elektrolytische Kapazität abgebildet.

Die Zersetzungszelle wird ausgeschaltet, sobald durch Wirkung der beiden in der Phase verschobenen Wechselströme der Motor zum Anlaufen als Zweiphasenmotor und zum Synchronismus gebracht worden ist.

Wegen der angegebenen Eigentümlichkeiten verwendet man Synchronmotoren nur dann, wenn an der Stelle, an der ein Motor Arbeit leisten soll, entweder eine andere Maschine zur Verfügung steht, durch die der Synchronmotor zum Anlaufen gebracht werden kann, oder wenn man an diesem Orte Gleichstrom, etwa durch eine Akkumulatorenbatterie geliefert, zur Verfügung hat, durch den man einen Gleichstrommotor in Tätigkeit bringt, der nach vorangegangenem Stillstand den Synchronmotor auf den Synchronismus bringen kann.

Man wird demnach meist nur größere Synchronmotoren verwenden, gegenüber deren Preis die Mehrkosten für die besonderen Antriebsvorrichtungen beim Anlaufen nicht sonderlich ins Gewicht fallen.

2. Die Wirkungsweise der Synchronmotoren.

Wir zeichnen uns in Fig. 271 die Abwicklung der Ständerwicklung eines Synchronmotors¹⁾ für eine Teilung und dazu die in einem gegebenen Augenblicke vom Wechselstrom in den Ankerspulen erzeugte Verteilung der radial verlaufenden, magnetischen Kraftlinien, wobei die Längen der Ordinaten die Dichte der Kraftlinien an diesen Stellen darstellen. Man erkennt dann sofort, daß die darunter gezeichneten aufeinander folgenden Süd- und Nordpole der Elektromagneten des Feldes in dieser Stellung angezogen werden, eine gewisse Zugkraft erfahren. (Man vergl. die Zeichnung einer Wechselstrommaschine Fig. 128, S. 185.)

Ruhen diese Pole, so werden sie mit dem Wechsel der Stromrichtung im Ständer bald angezogen, bald abgestoßen werden, und da diese Wirkungen gleich stark sind, wird der Läufer stehen bleiben.

Bewegt sich aber der Läufer so rasch, daß der Südpol gerade oder nahezu an die Stelle des benachbarten Nordpols gelangt ist, wenn der Wechselstrom gerade seine Richtung in einer halben Periode umgekehrt hat, so wird der Pol wieder angezogen u. s. f.; die angenommene Bewegung wird sich daher erhalten.

Hat der Motor 2 p Polpaare, so wird somit der Läufer in einer

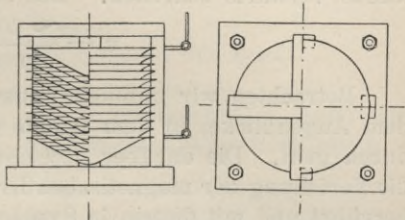


Fig. 270. Elektrolytische Zelle zur Einführung einer Kapazität in einen Wechselstromkreis.

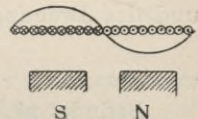


Fig. 271. Erklärung der Wirkung des Synchronmotors.

¹⁾ Den ruhenden Anker einer Wechselstrommaschine nennt man, wenn die Maschine als Motor verwendet wird, gewöhnlich Ständer (auch Stator).

vollen Periode, beim Synchronismus um eine volle Teilung d. i. um den pten Teil des Umfanges fortrücken. Wenn \sim Perioden in 1 Sekunde erfolgen, wird somit der Läufer um $\frac{\sim}{p}$ des Ankerumfanges in 1 Sekunde vorwärts schreiten. Der Motor macht somit in einer Minute

$$u = \frac{\sim \cdot 60}{p} \text{ Umläufe.}$$

Betrachten wir nunmehr einmal nur einen Draht, und zwar in dem Augenblicke, in dem gerade der Wechselstrom durch Null hindurch geht. Die darüber gezeichnete ausgezogene Wellenlinie möge die Verteilung der magnetischen Kraftlinien darstellen, die vom Läufer herrührt und mit diesem in Synchronismus rotiert. (Vergl. Fig. 272.)

Wenn der Läufer seine Stellung ändert, hat der die Windung durchfließende Wechselstrom die durch die Ordinaten der gestrichelten Linie dargestellte Richtung und Stärke. Der Strom wird dargestellt durch die Formel

$$J = J_{\max} \cdot \sin \omega t.$$

Die Zugkraft Z, welche das Feld auf den Leiter, oder dieser umgekehrt auf das Feld ausübt, ist proportional der Stromstärke J, proportional der Kraftliniendichte \mathfrak{B} und proportional der Länge l des Drahtes, es ist somit:

$$Z = \mathfrak{B} \cdot J \cdot l$$

und das Drehungsmoment D ist Kraft mal Hebelarm, also:

$$D = Z \cdot r = \mathfrak{B} \cdot J \cdot l \cdot r \dots \dots \dots 1)$$

wenn man mit r den Radius der Läuferoberfläche bezeichnet.

Befindet sich aber die Windung an einer beliebigen Stelle B im Felde, die um φ gegen die zuerst gezeichnete verschieden ist, so ist zur Zeit t der Strom:

$$J = J_{\max} \cdot \sin (\omega t - \varphi) \dots \dots \dots 2)$$

Das magnetische Feld, welches der rotierende Läufer mit sich führt, durchläuft, wegen des Synchronismus der Bewegung an jeder Stelle in einer Sekunde \sim mal volle Perioden, somit ist:

$$\mathfrak{B} = \mathfrak{B}_{\max} \cdot \sin \omega t \dots \dots \dots 3)$$

Die momentane Zugkraft, die der Wechselstrom in dem einen Drahte B auf den Läufer ausübt, ist somit:

$$Z = \mathfrak{B}_{\max} \cdot J_{\max} \cdot l \cdot \sin \omega t \cdot \sin (\omega t - \varphi) \dots \dots 4)$$

Der Mittelwert der Zugkraft während einer vollen Periode ist somit:

$$M(Z) = \mathfrak{B}_{\max} \cdot J_{\max} \cdot l \cdot M \{ \sin \omega t \cdot \sin (\omega t - \varphi) \}.$$

Nun ist aber:

$$M \{ \sin \omega t \cdot \sin (\omega t - \varphi) \} = M \{ \sin^2 \omega t \cdot \cos \varphi \} - M \{ \sin \omega t \cdot \cos \omega t \cdot \sin \varphi \}$$

Hierin sind $\sin \varphi$ und $\cos \varphi$ nicht veränderlich mit t , wir können diese konstanten Faktoren somit aus den Mittelwerten herausnehmen und erhalten:

$$M[\sin \omega t \cdot \sin(\omega t - \varphi)] = \cos \varphi \cdot M[\sin^2 \omega t] + \sin \varphi \cdot M[\sin \omega t \cdot \cos \omega t].$$

Nun ist aber:

$$M(\sin^2 \omega t) = \frac{1}{2} \text{ und } M[\sin \omega t \cdot \cos \omega t] = 0.$$

Für den Mittelwert der Zugkraft erhalten wir somit:

$$M[Z] = \frac{1}{2} \mathfrak{B}_{\max} \cdot J_{\max} \cdot l \cdot \cos \varphi \quad \dots \quad 5)$$

Hat man es statt mit einer mit n Windungen in jeder Spule des Ständers zu tun, so hat man vorstehenden Wert noch mit n und dem Spulenfaktor f zu multiplizieren.

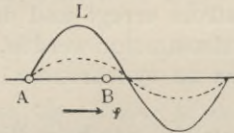


Fig. 272. Ableitung der Zugkraft.

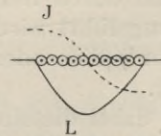


Fig. 273. Stellung des Magnetfeldes des Läufers zur Stromkurve bei Leerlauf.

Die Zugkraft ist, wie Gleichung 5) zeigt, abhängig von der Phase des Wechselstromes in der Windung im Verhältnis zur Phase des infolge der Rotation mit der Zeit sich ändernden Magnetfeldes, welches der Läufer hervorbringt.

Ist in der vollständigen Formel:

$$Z = \frac{1}{2} f \cdot \mathfrak{B}_{\max} \cdot J_{\max} \cdot n \cdot l \cdot \cos \varphi \quad \dots \quad 6)$$

$\varphi = 90$, wie dies Fig. 273 darstellt, so ist $M(Z)$ gleich null, weil gleichgroße und gleichsinnige Werte der Feldstärke bei gleichgroßen, aber entgegengesetztsinnigen Momentanwerten der Stromstärke eintreten.

Für $\varphi = 0$ ist $\cos \varphi = 1$ und damit erreicht die Zugkraft ihren Maximalwert:

$$Z_{\max} = \frac{1}{2} f \cdot \mathfrak{B}_{\max} \cdot J_{\max} \cdot n \cdot l \quad \dots \quad 7)$$

Bei gegebener Stärke des im Ständer pulsierenden Wechselstromes und gegebener Stärke des im Läufer erzeugten Magnetfeldes kann somit je nach der Phasendifferenz zwischen dem umlaufenden Magnetfelde und dem Wechselstrom jede beliebige Zugkraft zwischen den Grenzen 0 und Z_{\max} ausgeübt werden.

Übersteigt die Belastung dieses Maximum der Zugkraft, so kommt der Motor aus dem Synchronismus, er fällt außer Tritt, wie die Praktiker sagen, und bleibt stehen.

Bei gegebener, unter dieser Grenze bleibender Belastung stellt sich der Läufer so ein, daß die Phasendifferenz φ die richtige Zugkraft Z ergibt.

Da φ mit wachsender Zugkraft abnimmt, weil $\cos \varphi$ mit abnehmendem φ größer wird, so rückt der Läufer mit seinem Felde um so mehr gegen die in Fig. 273 gezeichnete Stellung zurück, je größer seine Belastung wird. Zwischen der Stellung bei Leerlauf (Fig. 273) und der Stellung bei Vollbelastung liegt ein Viertel der Teilung.

3. Der synchrone Drehstrommotor.

Bekanntlich ist eine Drehstrommaschine nur eine Wechselstrommaschine, in der statt eines drei miteinander verkettete, räumlich um $\frac{1}{3}$ Teilung versetzte und zeitlich um $\frac{1}{3}$ Periode verschobene Wechselströme erzeugt werden. Jede Drehstrommaschine kann nun, wenn ihr Feld durch fremden Gleichstrom erregt und dem Gehäuse Drehstrom zugeführt wird, zum Drehstrommotor werden, sowie man den als Läufer¹⁾ dienenden Magnetstern zu synchronem Laufe vorher gebracht hat.

Es tritt dabei dieselbe Erscheinung ein, wie beim Wechselstromsynchronmotor. Bei Leerlauf stellt sich der Magnetstern des Läufers so ein, daß sein rotierendes Magnetfeld symmetrisch gegen einen mit gleicher Geschwindigkeit rotierenden Nullpunkt der Stromverteilungskurven liegt. Dann befinden sich stets von gleichgroßen, aber entgegengesetzt gerichteten Strömen durchflossene Drähte unter gleichen Kraftliniendichten, und die resultierende Zugkraft ist null.

Bei Vollbelastung dagegen liegt das Feld in allen Stellungen symmetrisch zum Höchstwerte der Stromverteilungskurve (Fig. 272). Die Zugkraft ist dann ein Maximum. Der Läufer ist nunmehr um eine Viertelteilung gegen die Stellung bei Leerlauf zurück.

Die Zugkraft des Läufers setzt sich aus den Zugkräften der drei Phasen zusammen; nennt man diese Z_I , Z_{II} , Z_{III} , so ist die Gesamtzugkraft Z_D des Drehstrommotors:

$$Z_D = Z_I + Z_{II} + Z_{III} \dots \dots \dots 8)$$

In einem beliebigen Zeitpunkte ist, wie beim Einphasensynchronmotor:

$$Z_I = f \cdot \mathfrak{B}_{\max} \cdot J_{\max} \cdot l \cdot n \cdot \sin \omega t \cdot \sin (\omega t - \varphi)$$

worin diesmal f den Spulenfaktor der Dreiphasenwicklung ($f = 0,955$) und n die Zahl der Drähte einer Phase bezeichnet.

Wenn der der ersten Phase angehörige Draht die ωt entsprechende Stromstärke besitzt, hat der entsprechende Draht der zweiten Phase die $\sin \left(\omega t + \frac{2\pi}{3} \right)$ entsprechende Stromstärke und liegt an einer

¹⁾ Den rotierenden Magnetstern einer Wechselstrommaschine mit ruhender Ankerwicklung nennt man Läufer (auch Rotor).

Feldstelle, die in diesem Augenblicke die Kraftliniendichte

$$\mathfrak{B}_{\max} \cdot \sin(\omega t + 120)$$

besitzt. Der Strom ist ebenfalls um φ in der Phase verschoben und es ist somit:

$$Z_{II} = f \cdot \mathfrak{B}_{\max} \cdot J_{\max} \cdot l \cdot n \cdot \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \cdot \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3} - \varphi\right).$$

Entsprechend ist:

$$Z_{III} = f \cdot \mathfrak{B}_{\max} \cdot J_{\max} \cdot l \cdot n \cdot \sin\left(\omega t + \frac{4\pi}{3}\right) \cdot \sin\left(\omega t + \frac{4\pi}{3} - \varphi\right).$$

Bildet man die Summe, so erhält man:

$$Z_D = Z_I + Z_{II} + Z_{III} = f \cdot \mathfrak{B}_{\max} \cdot J_{\max} \cdot l \cdot n \cdot \left[\sin \cdot \omega \cdot t \cdot \sin(\omega t - \varphi) + \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \cdot \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3} - \varphi\right) + \sin\left(\omega t + \frac{4\pi}{3}\right) \cdot \sin\left(\omega t + \frac{4\pi}{3} - \varphi\right) \right]$$

Löst man die Glieder in den Klammern auf, so ergibt sich für den Klammerwert $\frac{3}{2} \cos \varphi$.

Es ist somit:

$$Z_D = \frac{3}{2} \cdot f \cdot \mathfrak{B}_{\max} \cdot J_{\max} \cdot l \cdot n \cdot \cos \varphi \quad . \quad . \quad . \quad 9)$$

Da hierin $3n$ die gesamte Drahtzahl des Ständers ist, so verhält sich die Zugkraft des Einphasensynchronmotors Z_E zur Zugkraft des Drehstrommotors Z_D unter sonst gleichen Betriebsbedingungen, wie die Spulenfaktoren der einphasigen und dreiphasigen Wicklung:

$$Z_E : Z_D = f_E : f_D = 0,637 : 0,937 \text{ nahezu wie } 2 : 3.$$

4. Die Leistung des Synchronmotors.

Die einem Drehstrommotor aufgedrückte Wechselfspannung (primäre Spannung) E_p muß in jedem Augenblicke drei anderen Spannungen das Gleichgewicht halten. Zunächst der EMK, die durch das magnetische Drehfeld, das die drei Phasenströme erzeugen, in der Ständerwicklung induziert wird. Diese EMK e ist der Stärke des magnetischen Drehfeldes und dieses der primären Stromstärke J_p proportional, e ist aber als induzierte EMK um 90° hinter der Stromstärke zurück. (Vergl. Kap. 2, 1, S. 21.) Hierzu kommt noch eine weitere EMK E_F , die durch das synchron rotierende Magnetfeld des Läufers in der Ständerwicklung induziert wird. Dieses Feld ist der Erregerstromstärke i_F proportional. Die Phase dieses Feldes und der durch dieses Feld induzierten EMK E_F hängt von der relativen Stellung des Feldmagnetkreuzes zum rotierenden Nullpunkt des in der Ständerwicklung umlaufenden Drehstromes ab. Endlich kommt

noch der Spannungsverlust in der primären Wickelung $J_p \cdot w_p$ hinzu, der mit der primären Stromstärke J_p in gleicher Phase ist.

Bei Leerlauf liegt jeder Nullpunkt des umlaufenden Drehstromes immer in der Mitte eines von den Läuferelektromagneten hervorgerufenen Feldes, denn nur in dieser Stellung, in der keine Zugkraft ausgeübt zu werden braucht, liegen gleich viel in der einen Richtung vom Strome durchflossene Drähte und ebenso viel in der anderen Richtung vom Strome durchflossene Drähte unter gleichgroßen und gleichsinnigen Stellen des von einem Pole des Läufersternes erzeugten Feldes (vergl. Fig. 273). Beim Leerlauf fallen also das magnetische Drehfeld, welches in der Ankerwicklung erzeugt

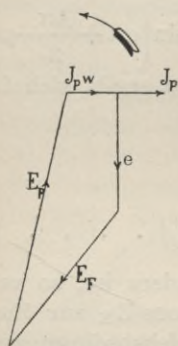


Fig. 274.

Diagramm der elektromotorischen Kräfte bei belastetem Synchronmotor.

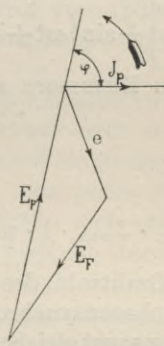


Fig. 275.

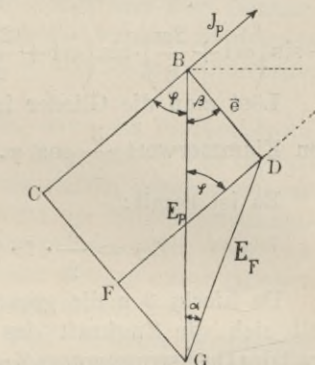


Fig. 276.

Graphische Darstellung der Leistung des Synchronmotors.

wird, und das vom Läufer erzeugte Magnetfeld zusammen. Beim Leerlauf haben also e und E_F gleiche Phase, weil sie von gleichzeitig im Ankereisen verteilten Magnetfeldern induziert werden.

Je mehr man den Motor belastet, um so mehr bleibt die relative Stellung des Ankersternes zurück. Bei Belastung wird also erst später das Maximum von E_F erreicht werden, als bei Leerlauf. Bei Belastung wird also E_F gegen e in der Phase verzögert sein, um so mehr, je stärker die Belastung ist.

Nummehr kann man das Vektorendiagramm der in Frage kommenden EMKräfte zeichnen.

Wir tragen zunächst (Fig. 274) horizontal $J_p w_p$, die durch Stromwärme in der primären Wickelung verbrauchte Spannung in der Richtung der Stromstärke auf, senkrecht dazu e und hieran je nach der Belastung verzögert E_F . Die Schlußlinie des Diagramms ist dann die EMK, die die aufgedrückte Spannung das Gleichgewicht halten muß.

für $\alpha = 90^\circ$ alsdann $\sin \alpha = 1$. Je nach der Größe von α liegt also A_D zwischen den Grenzwerten Null und $\frac{3}{C} E_P \cdot E_F$.

5. Der Synchronmotor als Stromerzeuger.

Es ist $\alpha = 0$ für Leerlauf, wo E_F direkt der aufgedrückten Spannung entgegen wirkt, und es ist $\alpha = 90$, wenn die Feldpole des Läufers um ein Viertel Teilung gegen die vorige Stellung zurückgerückt sind.

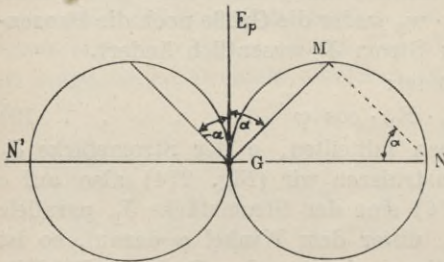


Fig. 277. Die Leistung der synchron laufenden Maschine als Motor und als Stromerzeuger.

Legen wir im Punkte G (Fig. 276) einen tangierenden Kreis an die E_P darstellende Gerade BG (vgl. Fig. 277),

dessen Radius $\rho = \frac{3}{2C} E_P \cdot E_F$

ist, und ziehen unter Winkel α eine Sehne GM, so muß, da der Durchmesser

$\overline{GN} = \frac{3}{C} \cdot E_P \cdot E_F$, und nach den bekannten Sätzen über die Winkel zwischen Tangente und Sehne am Kreise; $\overline{GNM} = \alpha$, und Dreieck GMN ein bei M rechtwinkliges ist:

$$\overline{GM} = \overline{GN} \cdot \sin \alpha = \frac{3}{C} \cdot E_P \cdot E_F \cdot \sin \alpha = A_D$$

sein.

\overline{GM} stellt also die vom Synchronmotor abgegebene Leistung A_D dar.

Bei Leerlauf ist $\alpha = 0$ und $\overline{GM} = 0$; bei Vollbelastung ist $\alpha = 90$, und es wird der Maximalwert $\overline{GN} = \frac{3}{C} \cdot E_P \cdot E_F$ erreicht.

Belastet man den Synchronmotor noch stärker, so fällt er außer Tritt und bleibt stehen.

Zeichnet man auch auf der anderen Seite von BG einen kongruenten, tangierenden Kreis, so ist auf dieser Seite α negativ, und damit auch $\sin \alpha$ und A_D , die abgegebene Leistung negativ, d. h. für negative Werte von α wird der Synchronmotor zum Stromerzeuger, er nimmt nicht mehr elektrische Energie auf, sondern gibt solche an die Leitungen zurück.

Die im günstigsten Falle von der synchron laufenden Maschine an das Netz abgegebene Leistung erreicht für $\alpha = -90^\circ$ wiederum einen Höchstwert nämlich $\frac{3}{C} \cdot E_P \cdot E_F$.

Man erkennt sofort, daß man hiermit auf die Grundbedingung für Parallelschaltung von Wechselstrommaschinen geführt worden ist.

Für $\alpha = 0$ wird der Winkel φ zwischen der Stromstärke J_p und der aufgedrückten EMK E_p in Fig. 275 gleich 90° . Für negative Werte von α wird φ größer als 90° , die Größe $J_p \cdot \cos \varphi$, d. i. die Wattkomponente des Stromes wird negativ, wenn die synchron laufende Maschine als Stromerzeuger tätig ist.

6. Der Einfluß der Erregung.

Bei den vorstehenden Betrachtungen war E_F die von den Feldmagneten des Läufers in der Ständerwicklung induzierte EMK. Demnach ist E_F der Stromstärke i_F des das Feld des Läufers erregenden Gleichstromes proportional. Wir wollen zunächst einmal annehmen, daß die Leistung A_D ihrer Größe nach ungeändert bleibe, und ebenso die aufgedrückte EMK denselben Wert E_p behalte, daß aber E_F infolge verschieden starker Erregung verschiedene Größen annehme.

Wenn A_D gleich bleibt, muß der Flächeninhalt des Rechteckes $FCBD$ (Fig. 276) und der halb so große Flächeninhalt des Dreieckes BDG , welches mit dem Rechteck dieselbe Basis BD und gleiche Höhe hat, ungeändert bleiben. Da ferner die eine Dreieckseite $BG = E_p$ konstant sein soll, müssen die Spitzen D verschiedener aber flächengleicher Dreiecke BGA auf einer Parallelen zu BG liegen. Die zu BG gezeichnete, gestrichelte Parallele (Fig. 278) ist der geometrische Ort der Spitzen der verschiedenen möglichen Dreiecke, die gleichgroßen Leistungen A_D des Synchronmotors entsprechen.

Wir zeichnen außer D noch verschiedene solche Dreiecke mit den Spitzen $D^I, D^{II}, D^{III}, D^{IV}$ (vergl. Fig. 278).

An den Enden von e in B ist jedesmal strichpunktirt die Stromstärke J_p , die auf e (nach Fig. 274) senkrecht ist, angetragen, ohne die Größen $J^I, J^{II}, J, J^{III}, J^{IV}$ besonders durch die Längen dieser Linien zu charakterisieren, da wir wissen, daß J_p der Größe von e proportional ist.

Man erkennt sofort, daß es einen Minimalwert GD^{II} von E_F in unserer Figur gibt, wenn $GD^{II} \perp$ auf BG ist. Man kann also eine vorgeschriebene Leistung des Synchronmotors mit einer niedrigsten Stromstärke der Gleichstromerregung des Feldes erreichen. Wird

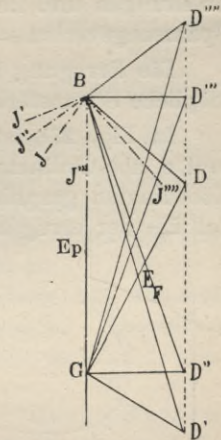


Fig. 278. Einfluß der Erregung bei konstanter Belastung und konstanter EMK.

dieser Minimalwert unterschritten, so kann der Synchronismus nicht erhalten bleiben, der Motor bleibt stehen. Mit diesem Mindestwert der Erregung wird man daher in der Praxis nicht arbeiten können, weil jede geringe zufällige Erhöhung der Belastung den Synchronmotor sofort außer Tritt bringen würde.

Von hoher praktischer Bedeutung ist jedoch der in $BD^{III}G$ dargestellte Fall, für den e und damit die e proportionale Betriebsstromstärke J_p ein Minimum wird. Dann ist, wie die Fig. 278 zeigt, e normal auf E_p und die Betriebsstromstärke J_p ist mit der aufgedrückten EMK E_p in gleicher Phase. Dies ist die günstigste Erregung, mit der man in der Praxis arbeitet, weil dann in den Zuleitungen und im innern Widerstand n_p des Motors der geringste Spannungsverbrauch durch Stromwärme stattfindet.

Die Erregung ist dann auch erheblich größer, als die kleinste mögliche Stromstärke, sodaß die Stabilität des Betriebes gesichert ist.

In Fig. 278 ist der Zusammenhang zwischen E_F als Abszisse und e als Ordinate für einen gegebenen Motor in rechtwinkligen Koordinaten graphisch dargestellt. Es ist dabei zu berücksichtigen, daß E_F der erregenden Feldstromstärke i_F und e der Betriebsstromstärke J_p proportional ist. Es sind daher in der Fig. 279 gleich i_F und J_p als Koordinaten benutzt.

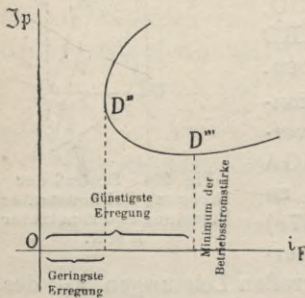


Fig. 279. Abhängigkeit der Betriebsstromstärke J von der Stärke der Erregung i_F beim Synchronmotor.

Aus der Betrachtung der Fig. 276 geht übrigens sofort hervor, daß wenn man die Belastung des Synchronmotors k mal vergrößert, einfach die Höhe des Dreieckes GDF in demselben Maßstabe vergrößert werden muß. In gleichem Verhältnis wächst dann aber auch die günstigste Erregung, die durch BD^{III} (in Fig. 278) dargestellt wird. Die günstigste Erregerstromstärke ist somit beim Synchronmotor der Belastung direkt proportional.

Im Falle D^{III} , dem der günstigsten Erregung ist, wie wir bereits vorher erwähnten, Betriebsstrom und -Spannung in gleicher Phase. Bei schwächerer Erregung als der günstigsten, bei kleineren Werten von i_F , als dem Punkt D^{III} entspricht, also in Fällen, die dem vor D^{III} gelegenen Teile der Kurve in Fig. 279 entspricht, eilt die Betriebsspannung der Stromstärke in der Phase voraus. Für stärkere Erregungen jedoch als die günstigste eilt der Strom J_p der Spannung E_p voraus.

Durch übererregte Synchronmotoren kann man somit dem Strom J_p , der diesen Motor speist, eine Phasenvoreilung erteilen.

Es ist dies ein wertvolles Mittel, dessen man sich gelegentlich bedient, um einem übermäßigen Spannungsabfall durch Phasenverschiebung in Wechselstromnetzen entgegenzuwirken, daß man übererregte Synchronmotoren als Phasenregler benutzt (vergl. Kap. 3, 3, S. 54).

7. Die Haupteigenschaften der Synchronmotoren.

In allen wesentlichen Eigenschaften stimmen einphasige und mehrphasige Synchronmotoren überein.

Synchronmotoren laufen, auch unbelastet, nicht von selbst an, sie müssen vielmehr erst durch eine fremde Antriebsmaschine nahezu auf Synchronismus gebracht werden.

Zur Erregung des Feldes ist eine besondere Gleichstromquelle erforderlich.

Die Erregung muß möglichst nahe der günstigsten Erregung gewählt werden, weil dann Betriebsstromstärke und Spannung gleiche Phase haben. Dann ist der Wirkungsgrad am günstigsten, die Verluste durch Stromwärme sind am kleinsten. (Die Phasengleichheit kann an einem Phasenmesser festgestellt werden.)

Der Synchronmotor läuft bei jeder Belastung mit konstanter Geschwindigkeit, die dem Synchronismus entspricht. Überschreitet die Belastung eine gewisse obere Grenze, so bleibt der Motor stehen. Eine Regelung der Tourenzahl ist unmöglich.

Wenn dem Motor an seiner Riemenscheibe Kraft zugeführt, statt entnommen wird, so arbeitet er als dem Stromerzeuger parallel geschaltete Maschine auf das Netz zurück; die Energiemenge, die in solchem Falle die Maschine in das Netz liefern kann, ist begrenzt.

Als Vorsichtsmaßregel ist zu beachten, daß nie Wechselstrom dem Anker zugeführt werden darf, solange nicht das Feld mit Gleichstrom erregt ist, es können sonst in den nur für Niederspannung isolierten Feldwickelungen unzulässig hohe Spannungen induziert werden, die zu einem Durchschlagen der Isolation und Gefährdung des Betriebspersonals führen können.

Die Leerlaufarbeit und Leerlaufstromstärke betragen erfahrungsmäßig bei gut konstruierten Synchronmotoren nur 10 bis 5% von den entsprechenden Größen bei Vollbelastung.

Um bei Synchronmaschinen einem starken Spannungsabfall durch Ankerrückwirkung vorzubeugen, muß die Zahl der Feldampèrewindungen 3 bis 4 mal größer sein als die Zahl der Ankerampèrewindungen. Derartige Maschinen müssen daher ziemlich viel Kupfer auf den Polen tragen.

20. Kapitel.

Der Zweiphasenmotor.

1. Entstehung eines magnetischen Drehfeldes durch zwei in der Phase verschiedene Wechselströme.

Zur Erläuterung der Entstehung eines rotierenden Magnetfeldes durch zwei in der Phase um eine Viertelperiode und räumlich um 90° verschobene Wechselströme bedienen wir uns einer einfachen Vor-

richtung, die in Fig. 280 dargestellt wird.

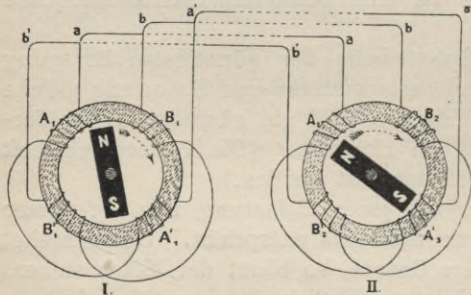


Fig. 280. Verbindung einer Zweiphasenmaschine mit einem Zweiphasenmotor.

Als Stromerzeuger benutzen wir eine Wechselstrommaschine I, die aus einem Grammering besteht, der mit vier Wicklungen versehen ist, die je einen Winkel von 90° miteinander bilden. Im Innern dieses Grammerings rotiert ein Magnet oder Elektromagnet

NS in der Richtung des Pfeiles. Die um 180° voneinander abstehenden Wicklungen A_1A_1' und ebenso B_1B_1' sind hintereinander geschaltet; von jedem solchen Paare führen dann je zwei Leitungen aa' und bb' zu dem ganz gleich eingerichteten Motor II.

Als Stromerzeuger benutzen wir eine Wechselstrommaschine I, die aus einem Grammering besteht, der mit vier Wicklungen versehen ist, die je einen Winkel von 90° miteinander bilden. Im Innern dieses Grammerings rotiert ein Magnet oder Elektromagnet

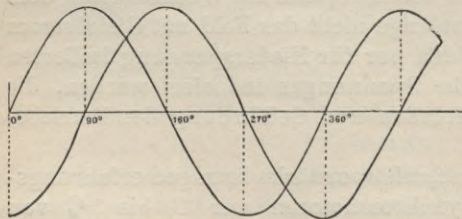


Fig. 281. Zwei um 90° in der Phase gegeneinander verschobene Ströme.

In den räumlich um 90° gegeneinander versetzten Wicklungen A_1A_1' und B_1B_1' werden zwei genau gleiche Wechselspannungen erzeugt, die in der Phase um eine Viertelperiode voneinander verschieden sind.

(Vergl. Fig. 281.) Die Maxima der induzierten EMK in den Windungen A_1A_1' treten ein, wenn in B_1B_1' keine EMK vorhanden ist; in B_1B_1' erreicht eine Viertelperiode später die EMK ihren positiven Höchstwert, wenn die EMK in AA' gerade durch Null

hindurchgeht. In dem als Motor dienenden Apparat II wird durch die entstehenden Ströme ein umlaufendes Magnetfeld, ein magnetisches Drehfeld, erzeugt. Wenn die Stromstärke in den Spulen AA' ein Maximum erreicht, ist sie in den Spulen BB' gleich null; die magnetisierende Wirkung dieses Stromes ruft im Gramminge des Apparates II zwei Doppelpole hervor, die genau unter den Mitten der Wickelung BB', in der Richtung des großen Pfeiles in Fig. 282 I liegen.

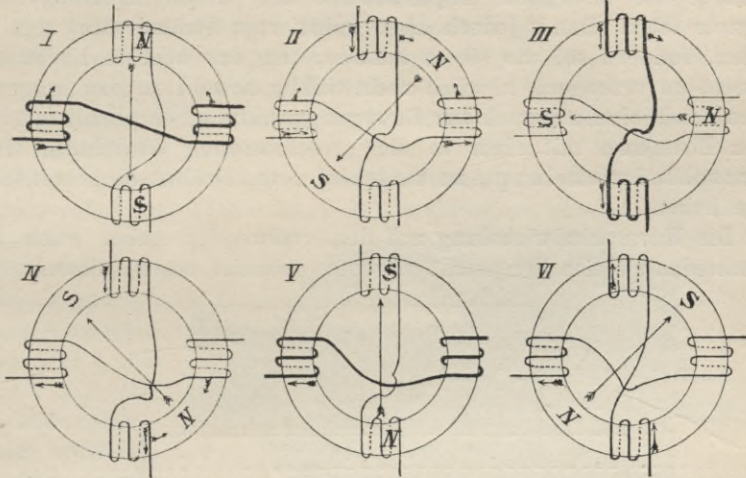


Fig. 282. Die aufeinander folgenden Lagen des magnetischen Drehfeldes beim idealen Zweiphasenmotor in den ersten sechs Achteln einer Wechselstromperiode.

Diese Doppelpole üben auf den drehbaren Magnet der Vorrichtung II eine Anziehung aus.

Wenn die Stromstärke in $A_2A'_2$ fällt, beginnt sie in $B_2B'_2$ zu steigen; beide Windungen erzeugen Kraftlinienfelder, die sich zu einem schräg stehenden Felde zusammensetzen, wie dies z. B. Fig. 282 II zeigt.

In Fig. 282 III, IV, V, VI ist die Lage der resultierenden Pole noch um vier Achtel einer vollen Wechselstromperiode weiter verfolgt, und man sieht, daß die Pole in derselben Zeit einmal um die Peripherie des Ringes herumlaufen, in der eine volle Periode der Wechselströme abläuft. Die Pole drehen sich also in einem solchen Ringe. Innerhalb einer vollen Periode eines Wechselstromes legt bei dem Zweiphasenmotor das Drehfeld den Weg von einem bis zum nächsten gleichnamigen Pol, im vorliegenden Falle, in dem die Wickelung für jeden der beiden Wechselströme zweipolig ist, also eine volle Umdrehung um 360° zurück.

Hat der Ring $2p$ Pole in jeder der beiden Wickelungen, so führt das Drehfeld während einer Periode des Wechselstromes immer nur den p ten Teil einer vollen Umdrehung aus. Die beiden Wickelungen

für die beiden Wechselströme sind je um ein Viertel des Abstandes zweier gleicher Pole, um ein Viertel der Teilung gegeneinander verschoben. Ein innerhalb des Ringes befindlicher magnet beweglicher Magnet NS (Fig. 282) wird der Drehung dieses magnetischen Drehfeldes folgen.

Aber auch ein Kupferzylinder wird infolge der in ihm erzeugten Wirbelströme dem Felde folgen, wie bei dem bekannten Aragoschen Versuche die bewegliche Kupferscheibe dem unter ihr rotierenden Magnete folgt. Damit jedoch diese induzierten Ströme nicht regellos fließen, sondern so, wie sie es müssen, um das höchste Drehungsmoment zu erzeugen, nämlich rechtwinklig sowohl zu den magnetischen Kraftlinien als auch zur Bewegungsrichtung, empfiehlt es sich, einen Eisenkern mit einer in sich geschlossenen Wicklung, einer Kurzschlußwicklung, zu versehen, deren Drähte die gewünschte Lage haben.

Die Kurzschlußwicklung auf dem rotierenden Anker kann auf verschiedene Weise hergestellt werden. Zumeist besteht dieselbe bei

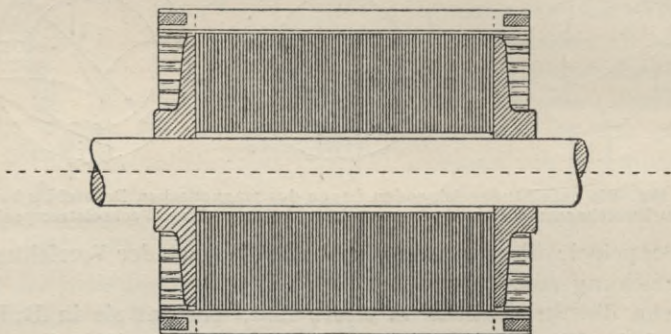


Fig 283. Kurzschlussanker, sogenannter Eichhornkäfig.

diesen und ähnlichen Apparaten aus Kupferstäben, die vom Eisenkörper isoliert sind, nahe dem äußeren Umfange, parallel der Drehachse, durch den Eisenkörper gehen und rechts und links durch Kupferringe miteinander verbunden sind. Die Kupferstäbe zwischen diesen beiden Kupferringen bilden dann einen ähnlichen Körper, wie die Laufrollen, die sich an den Käfigen mancher Eichhörnchen befinden; diese Art von Kurzschlußanker führt daher vielfach den Spitznamen »Eichhornkäfig«. Neuerdings ist die Bezeichnung »Käfiganker« allgemein geworden.

Späterhin hat v. Dobrowolski darauf hingewiesen, daß auf die Isolation der Stäbe von dem Eisen ohne Nachteil verzichtet werden kann.

Fig. 283 zeigt beispielsweise einen solchen Kurzschlußanker, in der Form, wie ihn Brown, Boveri & Cie. anwenden.

Im Anker können aber auch mehrere Abteilungen gewickelt werden, deren Stäbe hintereinander geschaltet werden, sodaß jede Abteilung ebenfalls ebenso viele Pole bildet wie das äußere Feld, und daß jede Abteilung entweder für sich kurz geschlossen wird oder daß sie an Schleifringen endet, wodurch beim Anlassen äußere Widerstände vorgeschaltet werden können. Solche Anker nennt man Phasenanker.

So zeigt z. B. Fig. 284 die Schaltung eines Phasenankers in zwei Abteilungen. Fig. 285 stellt einen fertigen Phasenanker der Maschinenfabrik Oerlikon mit drei Abteilungen dar.

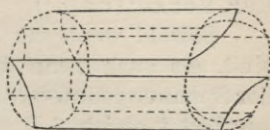


Fig. 284. Phasenanker mit zwei Abteilungen.

Bei Kurzschlußankern kann das Anker-eisen massiv sein.

Nach dem Prinzipie der Zweiphasenmotoren, das von Ferraris (1885) und Tesla (1887 bis 1891) entdeckt worden ist, sind schon im Jahre 1889

Elektromotoren von ziemlich hohem Wirkungsgrade (85 % bei einer 7 HP Maschine) hergestellt worden. Dieselben zeigten besonders die schätzenswerte Eigenschaft, mit Belastung anzulaufen und dem synchronen Gange zuzustreben.

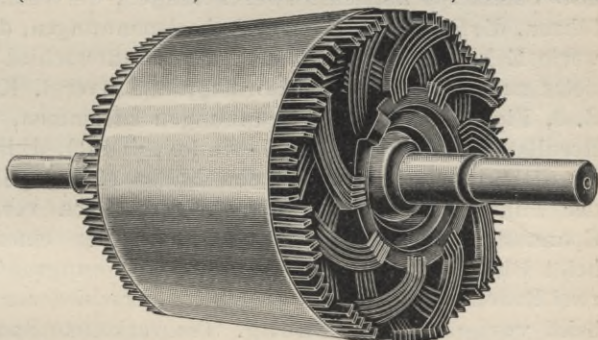


Fig. 285. Phasenanker der Maschinenfabrik Oerlikon mit drei Abteilungen.

2. Verkettung der Zweiphasenströme.

In den Abbildungen Fig. 280 und 282 I, II, . . . VI haben wir die Spulengruppen, die wir mit $A_1A'_1$ und $B_1B'_1$, bzw. mit $A_2A'_2$ und $B_2B'_2$ bezeichneten, zunächst vollständig unabhängig gedacht und angenommen, daß die Spulen $A_1A'_1$ des Stromerzeugers (I in Fig. 280) mit den Spulen $A_2A'_2$ der Motoren, und ebenso die Spulen $B_1B'_1$ mit den Spulen $B_2B'_2$ durch getrennte Hin- und Rückleitungen verbunden seien. Wir haben in diesem Falle zwei völlig unabhängige Stromkreise, in welchen zwei unabhängige Wechselströme zirkulieren, die einen Phasenunterschied von 90° besitzen.

Man kann aber sowohl in den Zweiphasenmaschinen als in den Zweiphasenmotoren die beiden Wicklungen AA' und BB' an den Stellen, wo sich in Fig. 282 der Verbindungsdraht der Spulen A und A'

mit dem der Spulen B und B' überschneidet, eine leitende Verbindung herstellen. Dann sind die beiden Spannungen und Ströme, wie der technische Ausdruck lautet, miteinander verkettet. Die Art der Verkettung, die in diesem Falle gewählt ist, führt den Namen » Sternschaltung«, und der Punkt, den die beiden Wechselstromkreise alsdann miteinander gemein haben, führt den Namen Nullpunkt der Verkettung.¹⁾

Sowohl wenn die Spulengruppen ganz unabhängig voneinander sind, als auch wenn die Verkettung in Sternschaltung stattfindet, ist der Spannungsunterschied zwischen den Leitungen a und a' (in Fig. 280) zur Zeit t gleich $2 E \sin \omega t$, und eben so groß ist der Spannungsunterschied zwischen den Leitungen b und b'. In dem Falle der Verkettung durch Sternschaltung ist der Spannungsunterschied zwischen den Leitungen a und b oder a' und b' oder a und b' oder a' und b, also überhaupt zwischen zwei Leitungen, die verschiedene Spannung führen, die Resultante zweier Wechselspannungen, die gleiche Maximalwerte E haben, die aber einen Phasenunterschied von 90° besitzen. Setzt man nach einem Vektordiagramm (vergl. Kap. 1, Abschn. 5, S. 8, Fig. 4) zwei solche Spannungen zusammen, so ergibt sich eine Resultante, die gleich $\sqrt{2} \cdot E \cdot \sin(\omega t \pm 45^\circ)$, d. h. 1,41 mal so groß als die Spannung zwischen den Enden einer Spule und um 45° in der Phase gegen beide Wechselspannungen verschoben ist. Der Spannungsunterschied zwischen den Enden einer der vier Spulen heißt Phasenspannung und der Spannungsunterschied zwischen zwei Enden zweier Spulen, die Ströme verschiedener Spannung führen, heißt verkettete Spannung. Die verkettete Spannung ist bei der Sternschaltung $\sqrt{2} = 1,41$ mal so groß als die Phasenspannung.

Bei dem in Fig. 286 dargestellten Falle, in dem nur eine gemeinsame Rückleitung bei dem Zweiphasensystem verwendet wird, ist die Spannung zur Zeit t zwischen einer der beiden äußeren Leitungen und der gemeinsamen Rückleitung gleich $2 E \sin \omega t$, d. h. gleich dem doppelten des Spannungsunterschiedes, der an den Enden einer Spule herrscht. Zwischen den beiden Hinleitungen besteht der Spannungsunterschied $2 \sqrt{2} \cdot E \cdot \sin(\omega t \pm 45^\circ)$.

Um die mittleren effektiven Spannungsunterschiede zu erhalten, braucht man nur die Sinusfunktionen in den vorher genannten Werten wegzulassen und die Maximalwerte durch $\sqrt{2}$ zu dividieren.

Bei dem in Fig. 286 dargestellten Falle des Zweiphasensystems mit drei Leitungen ist die Stromstärke in der mit zwei Spulen ver-

¹⁾ Fig. 280 stellt ein solches verkettetes System dar, wenn man sich denkt, daß sowohl am Punkte I, als am Punkte II die sich überschneidenden Stromleiter miteinander in metallischer Berührung stehen.

knüpften Leitung $\sqrt{2}$ mal so groß als die Stromstärke in jeder Spulenwindung und in den beiden anderen Leitungen.¹⁾

Außer der Verkettung durch Sternschaltung sind aber auch noch andere Arten der Verkettung möglich; es können z. B. die beiden Wicklungssysteme AB, A'B' hintereinander geschaltet und von den vier Vereinigungspunkten vier Leitungen abgeführt werden. (Vergl.

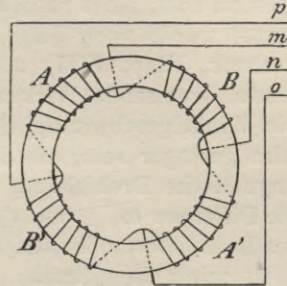
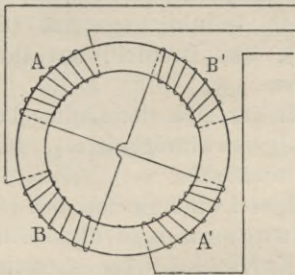


Fig. 286. Verkettete Zweiphasensysteme. Fig. 287.

Fig. 287.) Eine derartige Verkettung nennt man geschlossene Schaltung, Ringschaltung oder Kranzschaltung. Auch diese Art der Verkettung ist sowohl für Stromerzeuger, als für Motoren und für Transformatorenwickelungen anwendbar.

Der effektive Spannungsunterschied zwischen zwei Enden einer Spule, also z. B. zwischen p und m, zwischen m und n, n und o oder o und p ist die Phasenspannung $\frac{E}{\sqrt{2}}$.

Zwischen n und p oder zwischen m und o herrscht dagegen die verkettete Spannung

$$\frac{\sqrt{2} \cdot E}{\sqrt{2}} = E,$$

die gegen die Phasenspannungen um 45° vor- oder nachherrscht.

3. Wirkungsweise des Zweiphasenmotors.

Bisher nahmen wir an, daß im Innern des Ankers oder Ständers, der von zwei in der Phase um 90° verschobenen Wechselströmen durchflossen wird, ein Magnet oder Elektromagnet von dem magnetischen Drehfelde mitgenommen wird; nunmehr wollen wir uns als Läufer an Stelle eines Magneten einen in sich kurz geschlossenen Anker denken.

Auch ein solcher Kurzschlußanker, dem von außen keinerlei Strom zugeführt wird, folgt dem im Gehäuse des feststehenden Teiles (auch Ständer genannt) umlaufenden magnetischen Drehfelde. Die Ursache des entstehenden Drehungsmomentes sind Induktionsströme, die in den geschlossenen Ankerwindungen entstehen.

¹⁾ Gleiche Belastung der Zweige durch Bogen- und Glühlampen vorausgesetzt, falls auch solche zwischen den Leitungen eingeschaltet sind.

Da nun aber in Leitern nur Induktionsströme entstehen können, wenn zwischen dem induzierenden Magnetfelde, hier dem Drehfelde, und den Drähten, in welchen die Induktionswirkung hervorgerufen werden soll, eine relative Bewegung stattfindet, sodaß Kraftlinien geschnitten werden, so folgt daraus, daß der Läufer mit einer anderen Geschwindigkeit rotieren muß als das magnetische Drehfeld. Der Läufer kann auch nicht rascher als das magnetische Drehfeld laufen, denn sonst würde nach dem Lenz'schen Induktionsgesetze (Gleichstromtechnik, Kap. VIII, 2, S. 168), das Drehfeld auf ihn eine hemmende, bremsende Wirkung ausüben.

Die Winkelgeschwindigkeit ω_2 , mit der sich der Läufer bewegt, muß also geringer sein, als die Winkelgeschwindigkeit ω_1 , mit der das magnetische Drehfeld im Ständer umläuft.

Die Differenz $\omega_1 - \omega_2$ der Winkelgeschwindigkeiten des Läufers und des Drehfeldes, oder die Schlüpfung, wie man diese Differenz nennt, ist somit die Ursache der im Kurzschlußanker entstehenden Induktionsströme.

Bewegt sich der Anker mit derselben Winkelgeschwindigkeit wie das Drehfeld, so werden keine Kraftlinien von den Ankerwindungen geschnitten; es wird dann auch keinerlei hemmend^e oder beschleunigende Wirkung auf den Anker ausgeübt. Je langsamer der Anker läuft, je grösser die Schlüpfung ist, um so grösser ist die beschleunigende Kraft, die auf den Anker wirkt.

Je grösser die Zugkraft ist, die der Anker ausüben muss, um so mehr bleibt seine Umlaufzahl daher hinter der des magnetischen Drehfeldes zurück. Man nennt derartige Motoren daher *asynchrone Motoren*.

Bezeichnet man das Drehungsmoment, welches das umlaufende Drehfeld auf den Kurzschlußanker ausübt, mit D , so ist die Arbeitsleistung A_p , die in Form von elektrischer Energie der Wicklung des Ständers zugeführt werden muß:

$$A_p = D \cdot \omega_1.$$

Der Läufer dagegen leistet, Reibungswiderstände und Luftwiderstand eingeschlossen, eine sekundäre Arbeit A_s

$$A_s = D \cdot \omega_2.$$

Der Unterschied zwischen A_p und A_s muß gleich dem Verluste durch Stromwärme $i_s^2 \cdot \omega_s$ in der Kurzschlußwicklung des Ständers sein. Man hat somit:

$$i_s^2 \cdot \omega_s = A_p - A_s = D \cdot (\omega_1 - \omega_2).$$

Hieraus ergibt sich das Drehungsmoment D :

$$D = \frac{i_s^2 \cdot \omega_s}{\omega_1 - \omega_2} \dots \dots \dots 1)$$

Die EMK e , die in einem Drahte des Kurzschlußankers induziert wird, ist proportional der momentanen Feldstärke \mathfrak{B} des Drehfeldes an der Stelle, an der sich der Draht befindet, ferner proportional der Länge l des Drahtes, die der Induktionswirkung ausgesetzt ist, und ferner proportional der relativen Geschwindigkeit $r \cdot (\omega_1 - \omega_2)$ zwischen Draht und Magnetfeld. Denn wenn $\omega_1 - \omega_2$ die Winkelgeschwindigkeit ist, so ist die Umfangsgeschwindigkeit, mit der das Drehfeld an der Ankeroberfläche vom Radius r hingleitet $r \cdot (\omega_1 - \omega_2)$. Es ist demnach: $e = \mathfrak{B} \cdot l \cdot (\omega_1 - \omega_2) \cdot r \dots 2)$

Für einen bestimmten Augenblick t stellen wir uns die vom rotierenden magnetischen Drehfelde hervorgebrachte Verteilung der Felddichte graphisch dar, indem wir, von der Oberfläche des Ständers ausgehend, die Feldstärken nach Größe und Richtung radial auftragen. Bewegen wir uns nun selbst mit dem Drehfelde um den Läufer herum, sodaß für uns das Drehfeld feststeht, so durchläuft jeder Ankerdraht nach und nach mit der relativen Geschwindigkeit $\omega_1 - \omega_2$ dieses Feld; dadurch wird in ihm ein Wechselstrom induziert.

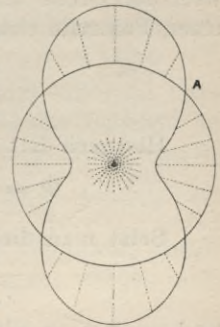


Fig. 288. Verteilung der Kraftlinien des Drehfeldes in einem gegebenen Augenblicke.

Ohne merklichen Fehler können wir zunächst annehmen, daß die Verteilung der Feldstärke um den Kurzschlußanker herum sinoidal verläuft. Für eine beliebige Stelle, die um einen Winkel α von einem Nullpunkte der Magnetfelddichte (z. B. dem Punkte A in Fig. 288) absteht, ist bei der hier gezeichneten 4 poligen Anordnung:

$$\mathfrak{B} = \mathfrak{B}_{\max} \cdot \sin 2 \alpha.$$

Denn für $\alpha = 0$ ist $\mathfrak{B} = 0$ und für $\alpha = 45^\circ$ ist $\mathfrak{B}_{45} = \mathfrak{B}_{\max}$; für $\alpha = 90^\circ$ ist $\mathfrak{B}_{90} = 0$ und für $\alpha = 135^\circ$ ist $\mathfrak{B}_{135} = -\mathfrak{B}_{\max}$ u. s. f., wie es der Fig. 288 entspricht.

Sind statt 4 jedoch 2 p Polpaare vorhanden, so ist:

$$\mathfrak{B} = \mathfrak{B}_{\max} \cdot \sin p \alpha.$$

Für einen solchen Ständer mit 2 p Polen ist alsdann:

$$e_s = \mathfrak{B}_{\max} \cdot l \cdot (\omega_1 - \omega_2) r \cdot \sin p \alpha \text{ und } i_s = \frac{e_s}{w_s} = \frac{\mathfrak{B}_{\max} \cdot l \cdot (\omega_1 - \omega_2) \cdot r \cdot \sin p \alpha}{w_s}.$$

Die effektiven Mittelwerte von e_s und i_s sind somit:

$$M \sqrt{[e_s^2]} = l \cdot (\omega_1 - \omega_2) \cdot M \sqrt{[\mathfrak{B}_s^2]}$$

und $M \sqrt{[i_s^2]} = \frac{l \cdot (\omega_1 - \omega_2) r}{w_s} M \sqrt{[\mathfrak{B}_s^2]}.$

Bezeichnen wir $M\sqrt{[e_s^2]}$ mit E_s und $M\sqrt{[i_s^2]}$ mit J_s , und beachten, daß die effektiven Mittelwerte (vergl. Kap. 1, 7, S. 13) gleich den Maximalwerten dividiert durch $\sqrt{2}$ sind, so erhält man:

$$J_s = \frac{r \cdot l}{w_s \cdot \sqrt{2}} \cdot \mathfrak{B}_{\max} \cdot (\omega_1 - \omega_2) \dots \dots \dots 3)$$

Nennt man die gesamte aus einem Pole des umlaufenden Drehfeldes austretende Kraftlinienzahl Φ , so kann Φ berechnet werden.

Φ ist der einfache Mittelwert der Grössen \mathfrak{B} für eine Polbreite. Es liegen nun auf der Länge $2 r \pi$, dem ganzen Umfange des Ständers, $2 p$ Pole, die Breite eines Poles ist somit $\frac{2 r \pi}{2 p}$. Der einfache Mittelwert der Größe $\sin p a$ für die Grenzen $p a = 0$ und $p a = \pi$, die einer Polbreite entsprechen, ist (vergl. Kap. 1, 8, S. 14):

$$M [\sin 2 a]_{p a = 0}^{p a = \pi} = 2$$

Hiernach ist:

$$\Phi = \frac{2 \mathfrak{B}_{\max} \cdot l \cdot r}{p} \text{ und } \mathfrak{B}_{\max} = \frac{\Phi \cdot p}{2 \cdot l \cdot r} \dots \dots \dots 4)$$

Setzt man dies ein, so erhält man:

$$J_s = \frac{\Phi \cdot p \cdot (\omega_1 - \omega_2)}{2 \cdot \sqrt{2} \cdot w_s}, \dots \dots \dots 5)$$

und wenn man dies in Gleichung 1) einführt:

$$D = \frac{J_s^2 \cdot w_s}{\omega_1 - \omega_2},$$

Beachtet man ferner, daß der Anker nicht nur einen Draht, sondern deren n enthält, so ergibt sich:

$$D = \frac{\Phi^2 \cdot p^2 \cdot (\omega_1 - \omega_2) \cdot n}{8 w_s} \dots \dots \dots 6)$$

Führt man aus Gleichung 5) den Wert von J_s ein, so findet man:

$$D = \frac{\Phi \cdot n \cdot J_s \cdot p}{2 \sqrt{2}} \dots \dots \dots 7)$$

4. Die Eigenschaften des Zweiphasenmotors.

Die Gleichungen 6) und 7) gestatten die Vorgänge beim Motor vollständig zu übersehen.

Wenn $\omega_1 - \omega_2$ null wird, d. h. wenn der Kurzschlußanker synchron mit dem magnetischen Drehfeld rotiert, ist das Drehmoment D gleich null. Unbelastet läuft also der Anker mit gleicher Geschwindigkeit, synchron, mit dem Drehfeld um. Die Schlüpfung $\omega_1 - \omega_2$ wird um so größer, der Anker bleibt um so mehr hinter dem Drehfelde zurück, je größer die Belastung wird. Im Kurzschlußanker

erzeugt die Induktion, die er durch das umlaufende Drehfeld erfährt, eine um so größere Stromstärke, je größer die Belastung D und je stärker damit die Schlüpfung $\omega_1 - \omega_2$ wird.

Die Zugkraft ist der Polstärke Φ und der Stromstärke J_s im Läufer proportional.

Beim Anlassen des Motors ist der Kurzschlußanker in Ruhe, also $\omega_2 = 0$, das Drehmoment beim Anlasser D_0 ist somit:

$$D_0 = \frac{\Phi^2 \cdot p^2 \cdot \omega_1 \cdot n}{8 w_s} \dots \dots \dots 8)$$

Der Zweiphasenmotor läuft somit auch bei Belastung von selbst an, solange die Belastung die durch Gleichung 8) gegebene obere Grenze nicht überschreitet.

Die Stromstärke beim Anlassen ist verhältnismäßig groß, wie die Gleichung 5) erkennen läßt, wenn man dort $\omega_2 = 0$ setzt.

Das magnetische Drehfeld legt (vergl. Fig. 282) während einer vollen Periode eines der beiden Wechselströme, die das Drehfeld erzeugen, den Weg einer Teilung zurück, d. i. bei einem Motor mit $2p$ Polpaaren also den Winkel $\frac{360^\circ}{p}$. Während einer Periode der Wechselströme, wird also der p te Teil einer Umdrehung ausgeführt. Da nun in 1 Sekunde \sim Perioden erfolgen, werden vom Drehfelde in 1 Sekunde $\frac{\sim}{p}$ Umdrehungen gemacht.

Der Anker läuft im Verhältnisse von $\omega_2 : \omega_1$ langsamer als das Drehfeld. Nennt man $\frac{\omega_1 - \omega_2}{\omega_1} = 1 - \frac{\omega_2}{\omega_1} = \sigma$ das Schlüpfungsvverhältnis, so ist $\frac{\omega_2}{\omega_1} = 1 - \sigma$.

Wir erhalten für die Umdrehungszahl U des Ankers in 1 Minute daher den Wert:

$$U = \frac{60 \sim}{p} (1 - \sigma) \dots \dots \dots 9)$$

Wird in Gleichung 5) $\omega_2 > \omega_1$, d. h. wird von einer Antriebsmaschine der Anker mit größerer Geschwindigkeit bewegt, als das Drehfeld im Ständer umläuft, so wird J_s negativ, d. h. der Motor wird zum Stromerzeuger und liefert Strom an die Zuführungsleitungen zurück, anstatt von diesen Strom zu empfangen.

Keht man die Richtung eines der beiden Wechselströme um, so läuft der Kurzschlußanker in entgegengesetzter Richtung um, der Zweiphasenmotor kann somit durch Richtungswechsel eines Stromes umgesteuert werden.

5. Elektromotoren für Zweiphasenstrom.

Vielfach werden sowohl Synchronmotoren als asynchrone Motoren für einphasigen Wechselstrom dadurch zum Angehen gebracht, daß man den zugeführten einphasigen Strom in zwei parallel geschaltete Teile verzweigt und den beiden Teilen, durch Einschaltung von Selbstinduktion mittels einer Drosselspule oder von Kapazität, eine Phasendifferenz erteilt. Diese beiden Ströme werden durch getrennte Feldwickelungen gesendet, die ein zweiphasiges Drehfeld erzeugen. Sowohl Ferraris als Tesla, die zuerst Drehfeldmotoren konstruierten, haben bereits von diesem Kunstgriffe Gebrauch gemacht.

Die Fig. 289 erläutert Einrichtung und Schaltung eines Zweiphasenmotors mit Kurzschlußanker, der von einer aus zwei Drähten bestehenden Leitung aus betrieben wird, die gewöhnlichen Wechselstrom führt. Der Phasenunterschied in den beiden um 90° gegen einander versetzten Wickelungen wird im vorliegenden Falle dadurch bewerkstelligt, daß die eine Wickelung mit einem Teile dieses Wechselstromes gespeist wird, während die andere Wickelung in eine Abzweigung eingeschaltet ist, in der sich eine auf elektrolytischem Wege erzeugte Kapazität C befindet.

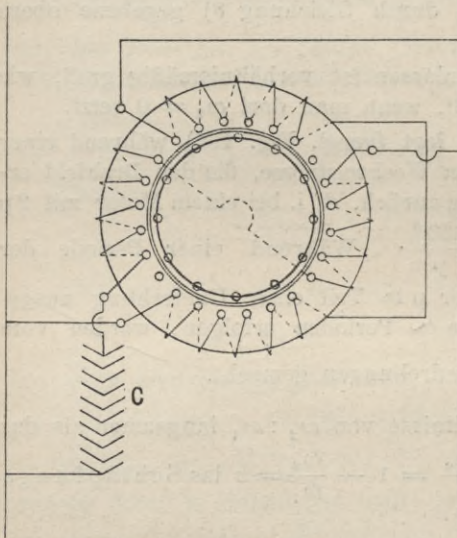


Fig. 289. Schaltung eines Zweiphasenmotors, der mit gewöhnlichem Wechselstrom gespeist wird.

Die Elektromotoren, die auf diese Weise betrieben werden, sind entweder gewöhnliche Teslamotoren mit zweiphasigem magnetischen Drehfeld und Kurzschlußankern, oder zwei miteinander verbundene Synchronmotoren.

Tesla hat (1888) zuerst gezeigt, daß man auch bei Energieübertragung mit zweiphasigem Wechselstrom mit nur drei Drähten auskommen kann, indem man für beide Wechselströme eine gemeinschaftliche im Verhältnis von $1 : \sqrt{2} = 1 : 1,41$ stärkere bemessene Rückleitung benutzt. Die Fig. 286 erläutert, in welcher Weise dann die Verbindungen mit den vier Wickelungen hergestellt werden können.

Auf europäischem Boden haben sich besonders Brown und später auch Fischinger mit der Ausbildung des Zweiphasensystems beschäftigt.

Die Einrichtung eines solchen Zweiphasenmotors kann aus Fig. 290 ersehen werden. Der feststehende induzierende Teil zeigt dieselbe Anordnung wie der Anker der Stromerzeuger, den wir in Kap. 14, Abschn. 2 auf S. 251 abgebildet haben. Man kann deutlich die in zwei Ebenen angeordneten A- und B-Spulen unterscheiden. In dem Hohlzylinder, der den induzierenden Teil, den Ständer, bildet, bewegt

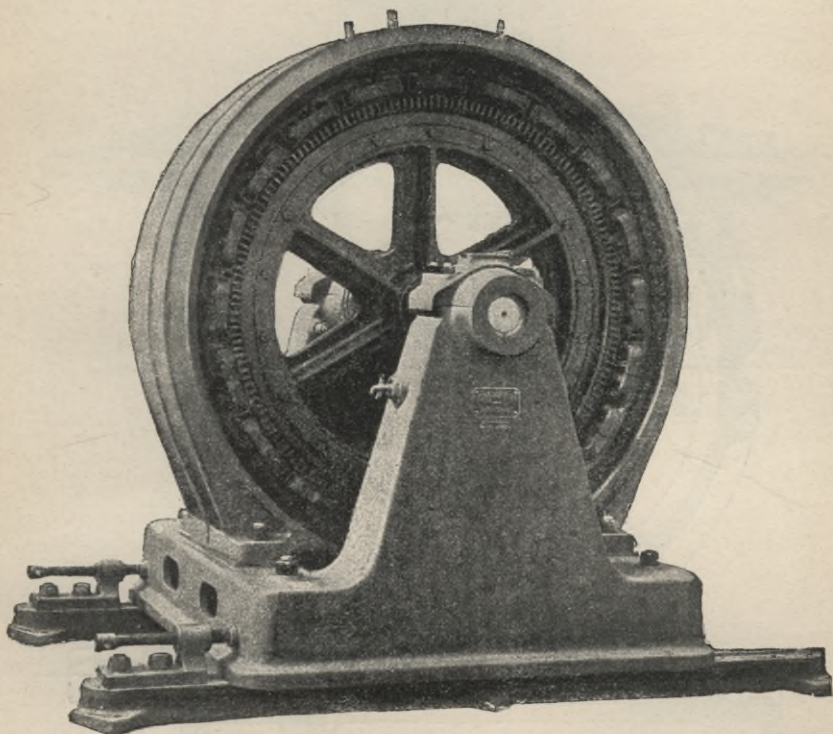


Fig. 290. Zweiphasenmotor von Brown, Boveri & Cie.

sich jedoch bei den Motoren eine aus isolierten Eisenblechen hergestellte Trommel mit Kurzschlußwicklung¹⁾ oder ein Phasenanker.²⁾

¹⁾ Nach Angaben des Herrn v. Dobrowolski können Kurzschlußanker auch aus massivem Eisen hergestellt werden.

²⁾ Über die in konstruktiver Hinsicht wichtigen Einzelheiten des in Fig. 290 abgebildeten Zweiphasenmotors haben die Herren Brown, Boveri & Cie. uns folgende Angaben gütigst zur Verfügung gestellt: Leistung 160 Pferdestärken. Polzahl 10. Umlaufzahl 480. Verkettete Spannung 1000 Volt. Stromstärke 80 Ampère.

Ständer: 400 Drähte von 30 *qmm* Querschnitt; Eisenquerschnitt 850 *qem*.

Läufer: 270 Drähte von 100 *qmm* Querschnitt; Eisenquerschnitt 750 *qem*.

Die im Läufer beobachtete Stromstärke betrug 180 Ampère und die an den Enden der Phasenwicklung gemessene Spannung 420 Volt.

Die Zuleitung der beiden Arbeitsströme zu den ruhenden Wicklungen des Ständers erfolgt durch die in der Abbildung oben sichtbaren Anschlußklemmen.

Fig. 291 a und 291 b stellt zwei Durchschnitte eines kleinen Zwei-phasenmotors für eine halbe Pferdestärke dar, der von der ehemaligen

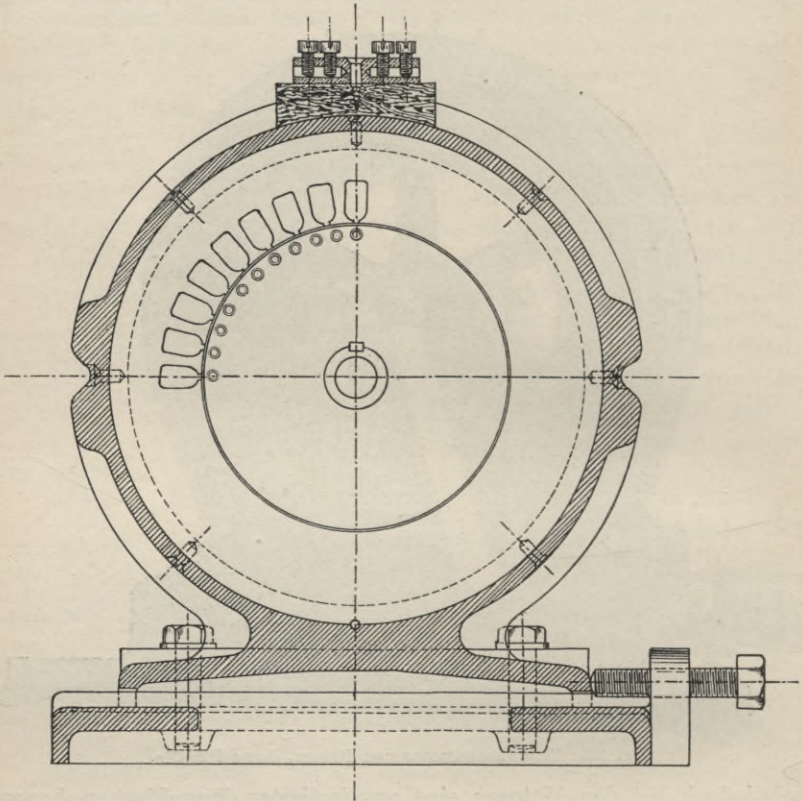


Fig. 291 a. Zweiphasenmotor von Fischinger.

Aktien-Gesellschaft Dresdener Elektrizitätswerke (vormals Kummer & Co.) herrührt und von Fischinger konstruiert ist.

Der Ankerdurchmesser desselben hat eine Größe von 136 mm. Der Luftzwischenraum zwischen Ständereisen und Oberfläche des Läufer Eisens beträgt 1 mm. Bei 1440 Umläufen in der Minute ist der Energieverbrauch des Motors ungefähr 560 Watt. Beträgt die verkettete Spannung etwa 240 Volt, so trägt die Wicklung des ruhenden Teiles, des Ständers, 704 Windungen in 32 Nuten. Der Draht ist

1,1 mm dick. Der Widerstand dieses Teiles beträgt 6 Ohm. Der zugehörige Läufer hat 240 Windungen in 48 Nuten. Die Drahtstärke beträgt 1,2 mm.

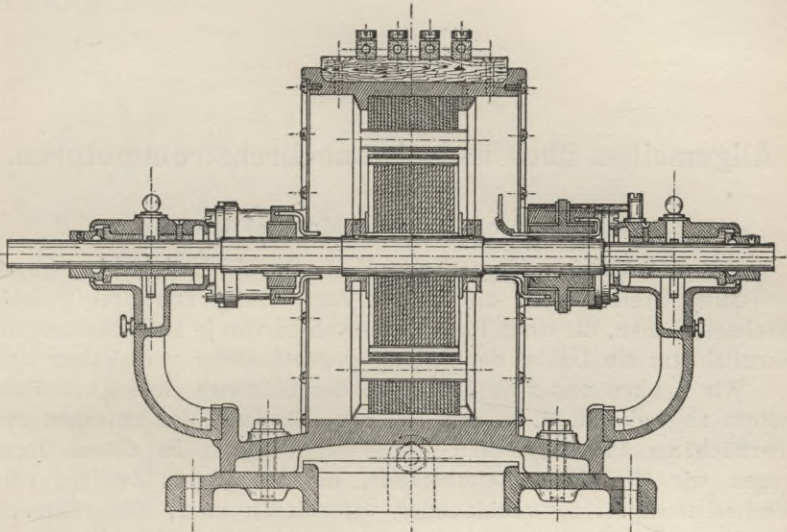


Fig. 291 b. Zweiphasenmotor von Fischinger.

21. Kapitel.

Allgemeines über asynchrone Drehstrommotoren.

1. Entstehung eines Drehfeldes bei Drehstrom.

Ein umlaufendes magnetisches Feld oder ein Drehfeld von gleichbleibender Stärke erhält man durch Anwendung von drei gleichen Wechselströmen, die einen Phasenunterschied von je 120° besitzen und räumlich um ein Drittel der Teilung gegeneinander verschoben sind.

Wir denken uns zwei Teilungen des Ständers eines Drehstrommotors abgewickelt, d. h. den Teil des Ständers, der zwischen zwei übernächsten Polen gleichen Vorzeichens liegt. In diesen Raum tragen wir für sieben Zeitabstände, die um je ein Zwölftel einer Wechselstromperiode voneinander verschieden sind, die räumliche Verteilung der Momentanwerte der den drei Stromstärken I, II, III proportionalen Wechselfelder a_I , a_{II} , a_{III} und den durch Übereinanderlagerung der drei Momentanwerte resultierenden Momentanwert des Drehfeldes auf. (Vergl. Fig. 292.)

Wir sehen, die durch die drei Wechselströme erzeugten Wechselfelder a_I , a_{II} , a_{III} bleiben stehen und schwanken nur auf und nieder; das entstehende Gesamtfeld (stark ausgezogen in Fig. 292) aber wandert in einer halben Periode um eine halbe Teilung von links nach rechts.

Der Momentanwert des Feldes a_I zur Zeit t an einer beliebigen Stelle, die durch einen Winkel α charakterisiert ist, wird für einen Motor mit p Polpaaren dargestellt durch:

$$\mathfrak{B}^I = \mathfrak{B}_{\max} \cdot \sin p \alpha \cdot \cos \omega t.$$

Entsprechend wird das zeitlich um ein Drittel Periode in der Phase und um ein Drittel Teilung räumlich verschobene Feld a_{II} dargestellt durch:

$$\mathfrak{B}^{II} = \mathfrak{B}_{\max} \cdot \sin (p \alpha - 120^\circ) \cdot \cos (\omega t - 120^\circ).$$

Dem dritten Felde a_{III} entspricht zur gleichen Zeit t und an derselben Stelle α die Gleichung:

$$\mathfrak{B}^{III} = \mathfrak{B}_{\max} \cdot \sin (p \alpha - 240^\circ) \cdot \cos (\omega t - 240^\circ).$$

Das resultierende Gesamtfeld \mathfrak{B} ist:

$$\mathfrak{B} = \mathfrak{B}^I + \mathfrak{B}^{II} + \mathfrak{B}^{III}.$$

Durch Auflösen und Ausrechnen der einzelnen Glieder ergibt sich:

$$\mathfrak{B} = \frac{3}{2} \mathfrak{B}_{\max} \cdot \sin(p a - \omega t).$$

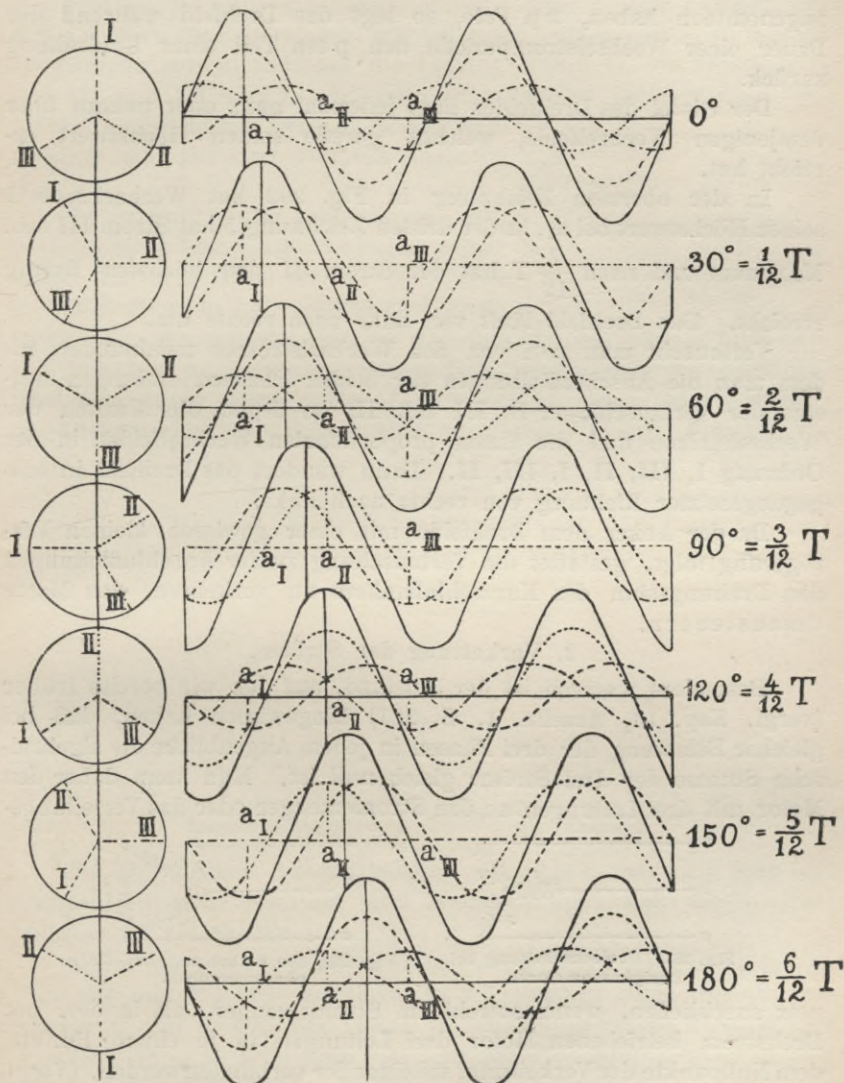


Fig. 292. Entstehung des Drehfeldes aus drei zeitlich und räumlich verschobenen Wechselströmen.

Der Maximalwert des Drehfeldes ist also $\frac{3}{2}$ mal so groß als der Maximalwert der einzelnen Wechselfelder.

Das resultierende Drehfeld zeigt wieder sinoidalen Verlauf.

Das Drehfeld schreitet in einer vollen Periode des Wechselstromes um eine volle Teilung, also um den Abstand je zweier gleichsinniger Pole der Ständerwicklung fort. Hat die Ständerwicklung, wie wir angenommen haben, $2p$ Pole, so legt das Drehfeld während der Dauer einer Wechselstromperiode den p ten Teil einer Umdrehung zurück.

Der Gipfel des Drehfeldes liegt jedesmal ganz oder nahezu über demjenigen Wechselfelde, welches gerade seinen Höchstwert erreicht hat.

In der obersten Zeichnung in Fig. 292 hat Wechselstrom I seinen Höchstwert bei a_1 , in der dritten Zeichnung 5 hat Strom III sein Maximum und nach $\frac{7}{12} T$ hat der Strom II den höchsten Betrag erreicht. Das Drehfeld läuft von links nach rechts um.

Vertauscht man zwei von den Wechselströmen miteinander, indem man die Anschlußleitungen der beiden Phasenwickelungen miteinander vertauscht, z. B. III mit II, so liegen die Maxima der Wechselströme und die ihnen proportionalen Wechselfelder in der Ordnung I, III, II, I, III, II. Dann wandert das Drehfeld in entgegengesetzter Richtung von rechts nach links.

Da der Anker dem Drehfelde mit einer gewissen kleinen Verzögerung folgt, gestattet die Vertauschung zweier Anschlußleitungen den Drehungssinn des Kurzschlußankers zu verkehren, den Motor umzusteuern.

2. Verkettung der Ströme.

Besonders wertvoll ist der Umstand, auf den wir bereits früher (vergl. Kap. 13, Abschn. 1, S. 221) hingewiesen haben, daß bei gleicher Belastung der drei Phasen in jedem Augenblicke die algebraische Summe der drei Ströme gleich null ist. Man kann daher den Motor mit drei Leitungen an den Stromerzeuger oder das Verteilungs-

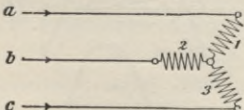


Fig. 293. Dreieckschaltung bei Dreiphasenmotoren.

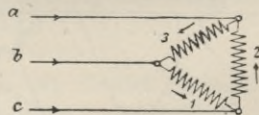


Fig. 294. Sternschaltung bei Dreiphasenmotoren.

netz anschließen, wenn sowohl im Stromerzeuger, als in dem mit Drehstrom betriebenen Motor drei Leitungen in je einem Punkte, dem Nullpunkte der Verkettung, miteinander verbunden werden. (Vergl. Fig. 294.)

Bei einer solchen Verkettung der drei Ströme, die gleichzeitig (1887) von Bradley, Wenström, Haselwander und v. Dolivo-

Dobrowolski selbständig erfunden worden ist, dienen immer die beiden anderen Drähte als Rückleitung für den in dem einen Drahte verlaufenden Wechselstrom.

Wenn nicht nur Dreiphasenmotoren, sondern auch Lampen von einem solchen Dreileitersystem aus betrieben werden sollen, so müssen die Lampen sowohl zwischen die Leitung I und II, als zwischen II und III und III und I, und zwar in möglichst gleicher Zahl und Stärke, eingeschaltet werden, wenn man wirklich mit nur drei Drähten auskommen will.

Da es nun häufig schwierig ist, die genau gleiche Lampenzahl zwischen jedem Paare der drei Leitungen zu jeder Zeit in Tätigkeit zu halten, so wird auch nicht immer die algebraische Summe der drei Ströme genau null sein.

In Fällen, wo gelegentlich erhebliche Unterschiede auftreten können, wird man durch einen vierten Leiter (den Ausgleich- oder Nulleiter) die Verkettungspunkte miteinander verbinden. (Vergl. Fig. 295.)

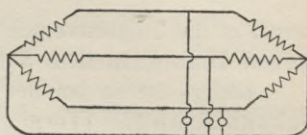


Fig. 295. Sternschaltung mit Ausgleichleiter.

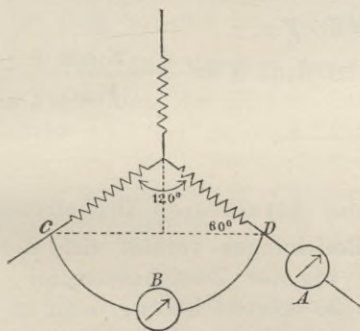


Fig. 296. Messungen bei Sternschaltung.

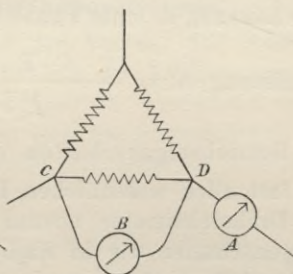


Fig. 297. Messungen bei Dreieckschaltung.

Ist ein solcher Ausgleichsleiter vorhanden, so wird man die Lampen zwischen jede der drei Hauptleitungen und diesen Ausgleichsleiter einschalten.

Wenn wir bei offener Schaltung oder Sternschaltung (vergl. Fig. 294 und Fig. 296 zwischen zwei Leitungen einen Spannungsmesser B und in eine der beiden Außenleitungen einen Strommesser A einschalten, so mißt zwar das eingeschaltete Ampèremeter richtig den in der Leitung fließenden Strom, das Voltmeter jedoch mißt nicht die in D vorhandene Phasenspannung E, sondern die zwischen den Leitungen C und D herrschende Spannung E', die sogenannte verkettete Spannung. Diese Hauptspannung E' ist aber die Resultante

tante aus zwei EMKräften, zwischen denen ein Phasenunterschied von 120° besteht. Es ist also (vergl. Fig. 177, S. 225):

$$E' = E \sqrt{3}.$$

Die Leistung einer Phase ist dann $A = \frac{E' \cdot J \cdot \cos \varphi}{\sqrt{3}}$ und die Leistung der drei Phasen zusammen A' ist gleich

$$A' = \frac{3 \cdot E' \cdot J \cdot \cos \varphi}{\sqrt{3}},$$

wenn φ die Phasenverschiebung des Stromes J gegen die in demselben Drahte, in dem J fließt, herrschende EMK bedeutet.

Anders ist es bei der geschlossenen Schaltung oder Dreieckschaltung. (Vergl. Fig. 297.) Das zwischen die Punkte C und D geschaltete Voltmeter B gibt dann unmittelbar die Phasenspannung E an; der Strommesser A aber zeigt nicht mehr die in einer der Wickelungen des Stromerzeugers oder Motors wirklich fließende Stromstärke J , sondern die eines Außenleiters, also J' an. J' aber setzt sich nach den Kirchhoffschen Sätzen aus zwei gleichen Wechselströmen von der Größe J zusammen, die um 120° gegeneinander in der Phase verschoben sind. Es ist dann:

$$J' = J \cdot \sqrt{3},$$

Die Leistung A einer Phase ist dann $A = \frac{J' \cdot E \cos \varphi}{\sqrt{3}}$ und die

Gesamtleistung $A' = \frac{3 \cdot J' \cdot E \cdot \cos \varphi}{\sqrt{3}}$.

3. Die Betriebseigenschaften des asynchronen Drehstrommotors.

In fast allen wesentlichen Beziehungen verhält sich der asynchrone Drehstrommotor ebenso wie der Zweiphasenmotor, dessen Haupteigenschaften wir in Kap. 20 erörtert haben, denn in beiden Fällen handelt es sich um ein magnetisches Drehfeld, welches den Anker mit der Verzögerung der Schlüpfung mitnimmt. Der Unterschied liegt lediglich darin, daß die Entstehungsursache des Drehfeldes beim Drehstrommotor eine andere ist.

Die in jeder kurz geschlossenen Ankerwicklung induzierte Stromstärke J_s hat (wie in Kap. 20, Gleichung 5, S. 364) den Wert:

$$J_s = \frac{\Phi \cdot p \cdot (\omega_1 - \omega_2)}{2 \sqrt{2} \cdot w_s}.$$

Das Drehmoment D , welches das Drehfeld auf den Läufer ausübt, ist gleich (Kap. 20, Gleichung 7, S. 364):

$$D = \frac{\Phi \cdot n \cdot J_s \cdot p}{2 \sqrt{2}},$$

wenn n die Zahl der Ankerwickelungen bezeichnet.

Der Motor läuft von selbst mit Zugkraft an. Die Umlaufszahl nimmt bei Betrieb des Motors mit konstanter Spannung mit steigender Belastung ab, von Leerlauf, bei dem der Anker sehr nahe synchron mit dem Drehfeld rotiert, bis zur Vollbelastung erfahrungsgemäß um etwa 5 %.

Übersteigt die Belastung eine gewisse obere Grenze, so bleibt der Motor stehen.

Wird durch eine besondere Antriebmaschine der Läufer rascher bewegt als das Drehfeld, so wird die Schlüpfung $\omega_1 - \omega_2$ negativ und der Motor wird zum Stromerzeuger und gibt Strom in die Zuführungsleitungen ab, statt Strom aufzunehmen. Der Asynchronmotor wird dann zum asynchronen Generator.

Wir fügen noch hinzu, daß bei Gebrauch von Kurzschlußankern, die gleiche Anzugskraft bei Stillstand bei ungefähr dreifachen Anlaßstromstärken erreicht wird, die man sonst braucht, um im Betrieb dieselbe Zugkraft hervorzubringen.

Die Leerlaufstromstärke beträgt ungefähr 30 bis 50 % von der Stromstärke, die bei Vollbelastung erforderlich ist; da aber bei Leerlauf die primäre Stromstärke gegen die primäre Spannung eine große Phasenverschiebung besitzt, so ist der Energieverbrauch bei Leerlauf nur 5 bis 10 % von der bei Vollbelastung.

4. Die Vorzüge des Drehstromsystems.

Die Verkettung der Ströme hat den Vorteil, daß dadurch die Stromstärke und bei gleichem Aufwande an Leitungsmaterial die Energieverluste durch Stromwärme erheblich vermindert werden.¹⁾ Bei gleicher Arbeitsleistung verhalten sich die Stromstärken bei einphasigem Wechselstrom I_W , bei Zweiphasenstrom J_z und bei Drehstrom J_D wie:

$$I_W : J_z : J_D = 1 : \frac{1}{2} : \frac{1}{\sqrt{3}} = 1 : 0,5 : 0,58.$$

Die Ankerrückwirkung, durch die vorzugsweise die Belastungsfähigkeit eines Stromerzeugers bedingt wird, und die Streuung hängen ebenfalls von der Stromstärke ab und sind ihr nahezu proportional. Auch von diesem Standpunkte aus sind daher die Mehrphasenmaschinen den mit einphasigem Strome betriebenen Vorrichtungen überlegen. Ferner wird bei dem Mehrphasenstrom das Material besser ausgenutzt. Bei gleicher magnetischer Beanspruchung der von Kraftlinien durchsetzten Eisenteile und gleicher Leistung stehen z. B. die erforderlichen Eisenmengen in nachfolgendem Verhältnis:

bei einphasigem Wechselstrom	1
» Zweiphasenstrom . . .	0,71
» Dreiphasenstrom . . .	0,67.

¹⁾ Man vergleiche die Abhandlung von Hans Görges, ETZ 1895, S. 46.

Was die Gewichte des Leitungsmateriales betrifft, so findet man, daß bei gleichen Betriebsspannungen, Verlusten und Leistungen sich die erforderlichen Kupfermengen verhalten:

bei Wechselstrom		bei Zweiphasenstrom		bei Dreiphasenstrom	
Zweileiter	Dreileiter ¹⁾	Dreileiter	Vierleiter	Dreileiter	Vierleiter ¹⁾
100	31,3	72,8	100	75	29,2.

Bei Kabeln ist die Vereinigung von vier Leitern selbstverständlich wesentlich unbequemer als die Unterbringung von zwei oder drei isolierten Leitern in einem Strange.

Bei Zweiphasenstrom mit drei Leitungen tritt zwischen den beiden nicht kombinierten Leitungen ein Spannungsunterschied auf, der $\sqrt{2}$ mal größer ist als die Betriebsspannung; die Isolation wird daher bei dem Zweiphasensystem mit drei Leitungen (vergl. Kap. 20, Abschn. 2, S. 361 u. s. f.) im Verhältnis von $1 : \sqrt{2}$ stärker beansprucht.

Die Mehrphasenmotoren sind den einphasigen Wechselstrommotoren nicht unerheblich überlegen.

Die Mehrphasenmotoren gehen von selbst, ohne Gebrauch von Hilfsvorrichtungen mit Belastung an, während die Einphasenmotoren, sowohl die synchronen, als die asynchronen, erst durch besondere Hilfsvorrichtungen auf eine dem Synchronismus nahekommende Geschwindigkeit gebracht werden müssen.

Da beim Einphasenmotor das Drehfeld nur unter der Wirkung der im Anker fließenden Ströme entstehen kann, so dürfen diese niemals null werden, auch nicht, wenn der Motor unbelastet läuft. Die Ankerströme beim asynchronen Mehrphasenmotor sind geringer, denn sie sind beim Leerlauf fast null, da dann im Anker fast keine Ströme entstehen; bei Belastung sind die Ankerströme ungefähr dem Tourenverluste (der Schlüpfung) proportional. Der Tourenverlust ist aber wiederum der Arbeitsleistung des Drehstrommotors proportional.

Tatsächlich ist beim Einphasenmotor der Verlust durch Stromwärme etwas mehr als doppelt so groß als beim Drehstrommotor.

Schaltet man z. B. beim Zweiphasenmotor den einen Strom aus, so muß man, um dieselbe Leistung hervorzubringen, die Stromstärke in der anderen Leitung verdoppeln, dadurch wächst der Verlust durch Stromwärme im quadratischen und gleichzeitig die Streuung im einfachen Verhältnis. In der Praxis hat sich gezeigt, daß ein einphasiger Wechselstrommotor von ungefähr gleichem Gewichte wie ein Mehrphasenmotor nur ungefähr 70 % von der Leistung des letzteren hervor-

¹⁾ Der Ausgleichsleiter ist halb so stark angenommen wie die beiden Außenleiter. Wenn die Belastung der Zweige gelegentlich große Unterschiede zeigt, muß der Ausgleichsleiter wesentlich stärker gewählt werden.

zubringen imstande ist und einen um mehrere Prozente geringeren Wirkungsgrad besitzt.

Wenn bei Drehstromanlagen infolge verschiedener Lampenzahl und -Größe die einzelnen Seiten ungleich belastet werden, so kann man, um die entstehenden Spannungsunterschiede auszugleichen, wie bereits oben erwähnt wurde, bei Sternschaltung sich eines vierten Drahtes bedienen, der vom Verkettungspunkte ausgeht. (Patent der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft.) Man kann aber auch nur da, wo an den Verbrauchsstellen erhebliche Unterschiede in der Belastung auftreten können, einen vierten Ausgleichsleiter anwenden und diesen zu dem Verkettungspunkte eines Drehstromtransformators führen, dessen drei Kerne nur mit je einer Phase bewickelt sind, die in Sternschaltung verkettet werden. (Patent von Siemens & Halske.)

Nach alledem sind die Vorzüge des Drehstromes gegenüber dem einphasigen Wechselstrom und dem Zweiphasensystem etwa in folgenden Sätzen zusammen zu fassen:

Die Dreiphasengeneratoren gestatten, das Material besser auszunutzen, d. h. Dreiphasenmaschinen sind bei gleicher Leistung billiger, weil der Wickelungsraum besser ausgenutzt werden kann. Diese Maschinen geben unausgesetzt und nicht periodisch wie die Wechselstrommaschinen Energie nach außen ab, bei ihnen tritt daher minder leicht ein Pendeln des Läufers gegen das Feld ein.

Die Verluste durch Stromwärme sind unter sonst gleichen Verhältnissen bei diesen Maschinen niedriger, weil die Stromstärken geringer sind.

Die Leitungen fallen bei diesem System billiger aus.

Die Drehstrommotoren gehen ohne besondere Hilfsvorrichtungen von selbst, auch mit Belastung, an und können leicht durch Vertauschung zweier Anschlußleitungen umgesteuert werden; sie sind billiger und besitzen günstigeren Wirkungsgrad als Einphasen- und Zweiphasenmotoren.

Die Regulierung auf konstante Spannung ist bei diesem Systeme einfach, der Spannungsabfall durch die Rückwirkung der Motoren ist geringer, und die Leerlaufstromstärke der Motoren kann in engeren Grenzen gehalten werden als bei Motoren der anderen Systeme. Als weiterer sehr erheblicher Vorteil zumal gegenüber der Gleichstrommotoren und der Synchronmotoren ist es ferner anzusehen, daß Drehstrommotoren ganz ohne Schleifringe und Bürsten mit nur festen stromführenden Leitern hergestellt werden können.

Als ein wesentlicher Nachteil der Drehstrommotoren ist es anzusehen, daß sich ihre Umlaufzahl nur in äußerst engen Grenzen verändern läßt.

22. Kapitel.

Theorie der Drehstrommotoren.

1. Analytische Theorie der Dreiphasenmotoren nach E. Arnold.

Wir gehen, einer Darstellung von E. Arnold¹⁾ folgend, von einer schematischen Figur eines Drehstrommotors aus. (Vergl. Fig. 298.) Derselbe ist zweipolig und die drei Phasen ABC schließen Winkel von 120° miteinander ein. Die Feldwicklung des äußeren Ringes besteht aus sechs Spulen; zwei gegenüberliegende Spulen gehören

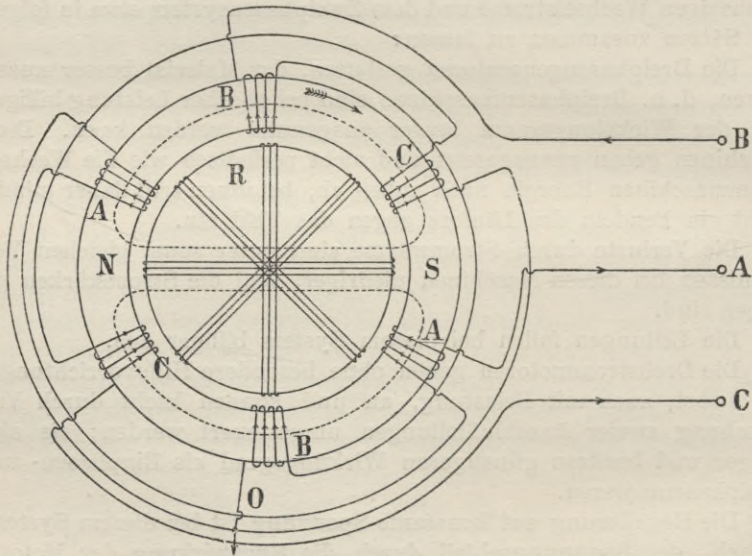


Fig. 298. Schematische Darstellung eines Drehstrommotors.

zu derselben Phase, sodaß die Phasendifferenz der Ströme zweier benachbarter Spulen 60° beträgt. Der Anker R enthält vier in sich geschlossene Spulen, die je einen Winkel von 45° miteinander einschließen. Die in den vier kurzgeschlossenen Windungen von dem magnetischen Drehfelde induzierten Ströme haben daher in je zwei benachbarten Spulen eine Phasendifferenz von 45° .

¹⁾ E. Arnold, Die Theorie und Berechnung der asynchronen Wechselstrommotoren, Zeitschrift für Elektrotechnik, Heft I bis VII, Jahrgang 1894.

Der in jeder Läuferwicklung induzierte Strom erzeugt ein periodisch veränderliches Magnetfeld, dessen maximale Induktion \mathfrak{B}_s sein mag. Die Phasenunterschiede dieser Felder sind $\frac{\pi}{m_s}$, wenn m_s die Anzahl der in gleichem Winkelabstand auf dem Anker angebrachten Kurzschlußwickelungen bezeichnet.

Die im Anker induzierten Ströme erzeugen ebenfalls ein mit derselben Winkelgeschwindigkeit ω rotierendes konstantes Magnetfeld von der Stärke $\frac{m_s \mathfrak{B}_s}{2}$, das aber um einen Winkel $\frac{\pi}{2} + \varphi_2$ hinter dem

im äußeren Ringe erzeugten rotierenden Magnetfeld zurückbleibt.

Auch das im Läufer entstehende magnetische Drehfeld können wir uns durch die in einer der

Kurzschlußwickelungen wirkende konstante

Stromstärke $\frac{m_s J_s}{2}$ ersetzt

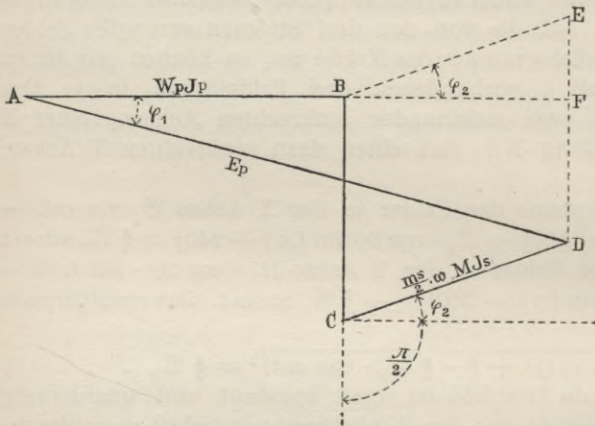


Fig. 299. Vektordiagramm der Spannungen in der Ständerwicklung bei ruhendem Anker.

denken, die um den Winkel φ_2 gegen das primäre Feld zurückbleibt und mit diesem rotiert.

Die EMK, die in der Ständerwicklung tätig ist, muß nun drei EMKräften das Gleichgewicht halten:

1. Dem Spannungsverlust $J_p \cdot W_p$, den der zugeführte Drehstrom in dem Widerstand W_p jeder Ständerwicklung veranlaßt.

2. Der durch das primäre Drehfeld induzierten EMK, deren maximale Größe $\frac{3}{2} \cdot J_p \cdot L_p \cdot \omega$ ist. Diese ist gegen $J_p \cdot W_p$ um 90° verschoben.

3. Der durch das im Anker entstandene Drehfeld induzierten elektromotorischen Gegenkraft, deren Höchstwert

$$\frac{m_s}{2} \cdot \omega \cdot M J_s$$

ist, und die gegen die in 2. genannte EMK eine Phasenverschiebung

um den Winkel $\frac{\pi}{2} + \varphi_2$ besitzt. Diese drei EMKräfte setzen wir nach einem Vektordiagramm zusammen. (Vergl. Fig. 299.)

Wir machen $\overline{AB} = W_p J_p$, senkrecht dazu konstruieren wir $\overline{BC} = \frac{3}{2} \omega J_p L_p$ und tragen unter dem Winkel $\frac{\pi}{2} + \varphi_2$ die Strecke $\overline{CD} = \frac{m_s}{2} \omega J_s M$ auf.

Dann bestimmt die Schlußlinie AD des Vektordiagramms nach Größe und Richtung den Maximalwert E_p der primären EMK; φ_1 ist der Winkel der Phasenverschiebung zwischen der primären Stromstärke J_p und der primären EMK von der Größe E_p .

Das primäre Drehfeld induziert im Läufer eine EMK von der maximalen Größe:

$$E_s = \frac{3}{2} \cdot \omega \cdot M \cdot J_p \dots 3)$$

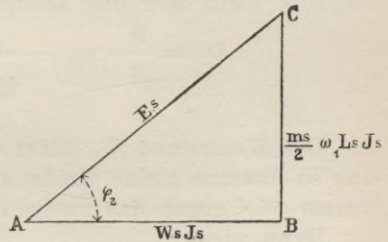


Fig. 300. Spannungsdiagramm für die Läuferwicklung.

Diese EMK hält zwei anderen EMKräften das Gleichgewicht:

1. Dem Spannungsverlust, der in einer Kurzschlußwicklung des Ankers vom Widerstande W_s durch den Strom J_s hervorgebracht wird. Er beträgt: $W_s J_s$.

2. Der einen Phasenunterschied von 90° dagegen besitzenden EMK, die das sekundäre Drehfeld in jeder Kurzschlußwicklung des Läufers induziert; diese hat den Wert

$$\frac{m_s}{2} \cdot \omega \cdot L_s \cdot J_s.$$

Diese drei EMKräfte, E_s und die beiden eben genannten Gegenkräfte, können also in einem rechtwinkligen Dreieck zusammengesetzt werden, dessen Hypotenuse E_s ist. (Vergl. Fig. 300.)

Aus diesem Dreieck kann man sofort folgende drei Gleichungen ablesen:

$$\begin{aligned} \cos \varphi_2 &= \frac{W_s}{\sqrt{W_s^2 + \left(\frac{m_s}{2} \cdot \omega \cdot L_s\right)^2}} \\ \sin \varphi_2 &= \frac{\frac{m_s}{2} \cdot \omega \cdot L_s}{\sqrt{W_s^2 + \left(\frac{m_s}{2} \cdot \omega \cdot L_s\right)^2}} \dots \dots \dots 4) \end{aligned}$$

$$J_s = \frac{3}{2} \cdot \frac{\omega \cdot M \cdot J_p}{\sqrt{W_s^2 + \left(\frac{m_s}{2} \cdot \omega \cdot L_s\right)^2}} \dots \dots \dots 5)$$

Die im Anker in jeder Sekunde induzierte Arbeit in Watt ist:

$$A_s = \frac{m_s}{2} \cdot W_s \cdot J_s^2 = \frac{9 \cdot m_s \cdot \omega^2 \cdot M^2 \cdot J_p^2 \cdot W_s}{8 \cdot \left\{ W_s^2 + \left(\frac{m_s}{2} \cdot \omega \cdot L_s\right)^2 \right\}} \dots \dots 6)$$

Dividieren wir diese Arbeit durch die Winkelgeschwindigkeit ω , so finden wir das Drehungsmoment, das auf den ruhenden Anker ausgeübt wird, oder das Anzugsmoment D' . Dasselbe ist:

$$D' = \frac{9}{8} \cdot m_s \cdot \frac{\omega \cdot M^2 \cdot J_p^2 \cdot W_s}{W_s^2 + \left(\frac{m_s}{2} \cdot \omega \cdot L_s\right)^2} \dots \dots \dots 7)$$

Der Widerstand W_s einer Kurzschlußwicklung ist nun meist eine so überaus kleine Größe, daß man ohne merklichen Fehler im Nenner W_s^2 gegen das zweite Glied vernachlässigen kann.

Dann wird:

$$D' = \frac{9}{2} \cdot \frac{M^2 \cdot J_p^2 \cdot W_s}{m_s \cdot \omega \cdot L_s^2} \dots \dots \dots 8)$$

Ist keine Streuung vorhanden, so ist bekanntlich

$$M^2 = L_p \cdot L_s.$$

Kommen jedoch nicht alle, sondern nur der ν te Teil der im Ständer erzeugten Kraftlinien wirklich an den Windungen des Läufers zur Geltung, so ist:

$$M^2 = \nu^2 \cdot L_p \cdot L_s \dots \dots \dots 9)$$

Berücksichtigt man dies, so ist:

$$D' = \frac{9}{2} \cdot \frac{\nu^2 \cdot L_p \cdot J_p^2 \cdot W_s}{m_s \cdot \omega \cdot L_s} \dots \dots \dots 10)$$

Da der Streuungskoeffizient $\nu < 1$ sein muß und ν im Zähler im Quadrate auftritt, so erkennt man daraus, daß mit zunehmender Streuung (d. i. mit abnehmendem ν) das Drehungsmoment D kleiner wird.

Es ist nun klar, daß $3 L_p$ die Summe der Selbstinduktionen der drei Feldwickelungen, $m_s L_s$ die Summe der Selbstinduktionen der Läuferwicklung ist. Man erkennt, daß die Größe von D' wesentlich von dem Betrage des Quotienten $\frac{3 L_p}{m_s L_s}$ abhängt und außerdem von der Größe des Widerstandes W_s einer Kurzschlußwicklung des Ankers.

Berechnet man die Größe von D' als Funktion von W_s für ver-

schiedene Werte des erstgenannten Verhältnisses und stellt dieselbe graphisch dar, so ergibt sich Fig. 301.

Die ausgezogenen Kurven beziehen sich auf den Fall, daß keine magnetische Streuung vorhanden ($\nu = 1$) ist; die gestrichelten Kurven A_0 und B_0 gelten für solche Werte der Streuung, wie sie in der Praxis vorkommen. Die Kurve A' gilt für den Fall, daß $\frac{3 L_p}{m_s L_s} = 10$ und sehr starke Streuung vorhanden (ν klein) ist.

Man sieht, daß der Einfluß der Streuung um so mehr verschwindet, je größer der Widerstand W_s wird.

Das Anzugsdrehmoment des anlaufenden Ankers erreicht in jedem Falle für einen bestimmten Wert von W_s ein Maximum; dieser

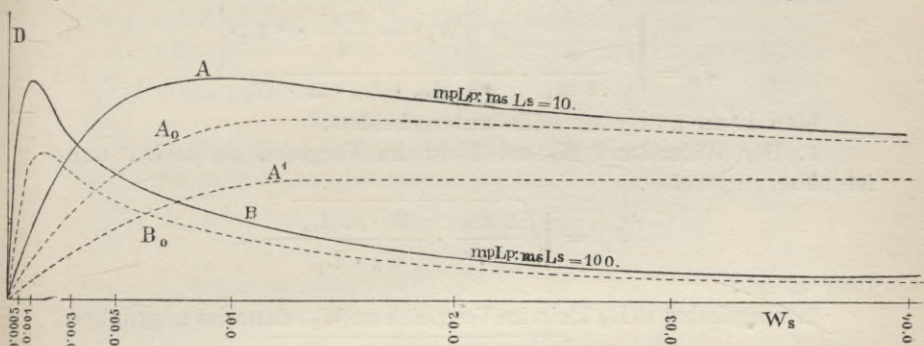


Fig. 301. Anzugsdrehmoment für verschiedene Verhältnisse $m_p L_p : m_s L_s$ und Widerstände W_s ohne und mit (gestr. Linie) Streuung.

Wert von W_s ist um so kleiner, je größer das Verhältniss $\frac{m_p L_p}{m_s L_s}$ ist. Bei einem gewöhnlichen Transformator würde dieses Verhältniss mit dem Umsetzungsverhältniss $\frac{N_p}{N_s}$ übereinstimmen.

Für die Güte eines Mehrphasenmotors ist es nun besonders wichtig, daß eine möglichst hohe Anzugskraft, d. i. ein möglichst großes Drehmoment D' des ruhenden Ankers mit möglichst geringem Wattverbrauche, also möglichst kleiner Stromstärke, erreicht wird. Ist nämlich die beim Ingangsetzen des Motors erforderliche Erregerstromstärke sehr groß, so wird dadurch die Streuung im Motor sowohl, als in der den Strom liefernden Quelle, sei dies eine Maschine oder ein Transformator, sehr groß; die Streuung und das Ansteigen der Stromstärke an sich veranlassen einen sehr bedeutenden Abfall der primären Spannung. Sind gleichzeitig Lampen an die Stromquelle angeschlossen, durch die die primäre Stromstärke geliefert wird, so wird sich der Spannungsabfall, wenn die Stromquelle

nicht eine sehr große Kapazität besitzt, störend durch Sinken der Helligkeit der Lampen bemerklich machen.

Bei ungünstiger Anordnung des Motors kann es, da der Erregerstrom gegen den Nutzstrom um 90° in der Phase verschoben ist, dahin kommen, daß, um die erforderlichen Watt hervorzubringen, die zum Anlaufen des Motors erforderliche Stromstärke mehrmals so groß ist als die zum regelmäßigen Betrieb des belasteten Motors erforderliche Stromstärke. Dies würde dann unwirtschaftlich dicke Zuleitungen, kräftiger gebaute Ausschalter, größere Meßinstrumente usw. nötig machen.

Aus der für D' gegebenen Formel 7) kann J_p berechnet werden, und zwar ist:

$$J_p = \sqrt{\frac{8}{9 m_s} \cdot \frac{D' \left[W_s^2 + \frac{m_s^2}{4} \omega^2 L_s^2 \right]}{\nu^2 \cdot L_p \cdot L_s \cdot \omega \cdot W_s}} \quad \dots \quad 11)$$

Man kann nun zwei Fälle unterscheiden:

1. Der Widerstand W_s sei klein im Vergleich zu ωL_s , dann ist näherungsweise:

$$J_p = \sqrt{\frac{2 m_s}{9 \nu^2} \cdot \frac{D' \cdot \omega L_s}{W_s \cdot L_p}}$$

oder es ist:

2. umgekehrt ωL_s klein im Vergleich zu W_s , dann ist angenähert:

$$J_p = \sqrt{\frac{8}{9 \nu^2 \cdot m_s} \cdot \frac{D' \cdot W_s}{\omega \cdot L_p \cdot L_s}}$$

Im ersten Falle, d. h. wenn die Läuferwicklung verhältnismäßig kleinen Widerstand besitzt, kann man durch Einschaltung von Hilfswiderständen in diese Windungen beim Angehen die Stromstärke verkleinern, oder man kann durch Verkleinerung von ω , d. h. durch Verringerung der Periodenzahl, J_p verkleinern. Letzteres ist nur möglich, wenn es angängig erscheint, den Motor mit dem Stromerzeuger zusammen angehen zu lassen. Bei einfachen Arbeitsübertragungen, in welchen ein größerer Motor allein die elektrische Arbeit des Stromerzeugers aufnimmt und die sämtlichen Maschinen einer Fabrik durch Transmissionen in Tätigkeit setzt, wird dies in seltenen Fällen zulässig erscheinen.

In dem in der Praxis häufiger vorkommenden zweiten Falle wird man geringere Stromstärken beim Anlaufen dadurch erreichen, daß man die Selbstinduktion L_s des Läufers, etwa durch Einschalten von Drosselspulen, möglichst groß macht. Da auch L_p im Nenner steht, wird man $M = \nu \sqrt{L_p L_s}$ tunlichst zu vergrößern suchen müssen. Das kann man dadurch erreichen, daß man den magne-

tischen Widerstand des Kraftlinienweges verringert, d. h. vor allem den Luftzwischenraum δ zwischen Feldeisen und Ankereisen recht klein wählt und auch sonst alles tut, um ν möglichst groß, d. h. die magnetische Streuung recht klein zu machen.

Um die Anlaufstromstärke recht niedrig zu halten, hat man endlich, da der vom Motor aufgenommene Effekt den Wert

$$\frac{3}{2} E_p J_p \cos \varphi_p$$

besitzt, noch die beiden anderen Wege, nämlich den, E_p groß zu wählen, oder die Anordnung so zu treffen, daß der Leistungsfaktor $\cos \varphi_p$ nahe gleich 1 wird.

Der Wert von $\cos \varphi_p$ kann ohne weiteres aus dem rechtwinkligen Dreieck DAF in Fig. 299 (S. 380) abgelesen werden.

Es ist:

$$\cos \varphi_p = \frac{J_p}{E_p} \cdot (W_p + \frac{1}{2} m_s \cdot \omega \cdot M \cdot J_s \cdot \cos \varphi_s) \quad . \quad . \quad 12)$$

Wenn man für J_s und $\cos \varphi_s$ die früher gefundenen Werte einsetzt, kann man unter der vereinfachenden Annahme, daß W_s gegen $\omega \cdot \frac{m_s}{2} \cdot L_s$ klein ist, näherungsweise dafür schreiben:

$$\cos \varphi_p = \frac{J_p}{E_p} \left(W_p + \frac{3}{m_s} \cdot \nu^2 \cdot \frac{N_p^2}{N_s^2} \cdot W_s \right) \quad . \quad . \quad 13)$$

Hierin bedeutet N_p die Zahl der Drähte für jede der drei Phasen in der Ständerwicklung und N_s die Anzahl Drähte in jeder Phase der Läuferwicklung.

Man sieht, daß man W_p und W_s und $\frac{N_p}{N_s}$ recht groß und ebenso E_p tunlichst klein machen müßte, damit der Winkel φ_p recht klein und der Leistungsfaktor $\cos \varphi_p$ möglichst groß wird.

Daraus ergeben sich verschiedene Möglichkeiten, um stillstehende Drehstrommotoren mit geringen Stromstärken J_p zum Anlaufen zu bringen:

1. Man kann in den primären Stromkreis induktionsfreie Widerstände einschalten, um W_p zu vergrößern.

2. Man schaltet beim Anlassen in die Läuferwindungen Widerstände etwa durch Schleifringe ein, die später beim Betriebe kurz geschlossen werden.

3. Es wird m_s verkleinert, dadurch, daß man beim Anlassen nur einen Teil der Ankerwindungen kurz schließt und die anderen erst später, wenn der normale Betrieb erreicht ist.

4. Durch Gebrauch eines Transformators mit veränderlichem Übersetzungsverhältnis kann beim Angehen $\frac{J_p}{E_p}$ vergrößert werden.

5. Auch das Verhältnis $\frac{N_p}{N_s}$ kann durch geeignete Vorrichtungen

während des Anlaufes vergrößert werden, indem man z. B. beim Angehen einige Phasen des Ankers entgegengesetzt einschaltet.

Die magnetische Streuung, von der hier wiederholt die Rede ist, und die das Auftreten des Faktors ν , beziehentlich sogar des Quadrates ν^2 bedingen, ist eine sehr verwickelte Erscheinung. Einmal wird jeder Leiter von Kraftlinien umgeben, die sich, zumal bei Einbettung in Löchern, im Eisen schließen, ohne vom Ständer auf den Läufer überzugehen. (Vergl. Fig. 302.) Diesem Übel kann man dann dadurch steuern, daß man den innersten Eisenstreifen entweder äußerst dünn macht oder ihn ganz wegfräst, sodaß Nuten mit übergreifenden Zähnen entstehen. Nur die Kraftlinien, welche die Läuferwicklung umfassen, sind wirksam.

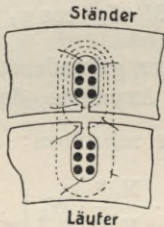


Fig. 302. Nützliche Kraftlinien und Streulinien.

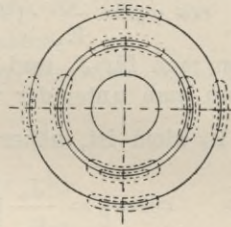


Fig. 303. Nützliche Kraftlinien und Streulinien.

Andererseits schließen sich aber auch zahlreiche Kraftlinien, die im Ständer erzeugt werden, durch die Luftschicht, die Ständer und Läufer voneinander trennt, und ebenso schließen sich wenigstens bei Ringwicklung Kraftlinien außen am Eisengestell (vergl. Fig. 303).

Endlich schließen sich auch von den im Läufer erzeugten Kraftlinien viele durch den Luftzwischenraum und im Läuferisen.

Bezeichnet man den Streuungskoeffizienten des Ständers mit τ_p , den des Läufers mit τ_s , so ist τ der Streuungskoeffizient des Motors

$$\tau = \tau_p + \tau_s + \tau_p \cdot \tau_s.$$

Der Streuungskoeffizient ist das Verhältnis der nützlichen Kraftlinien zu den überhaupt erzeugten Kraftlinien.

Die Streuung wächst mit der Breite δ des Luftzwischenraumes, mit der Höhe der magnetischen Induktion \mathfrak{B} und bei gegebenem Durchmesser mit der Polzahl $2p$. Vor allem steigt die Streuung stark mit der Belastung, weil sie mit der Stromstärke wächst.

Bei Trommelwicklung ist die Streuung geringer, weil da die Streuung an der Außenfläche wegfällt.

Um die Streuung zu vermindern, verkleinert man die Polflächen, indem man kurze Konstruktionen von größerem Durchmesser bevorzugt. Die seitliche Streuung sucht man durch Kupferplatten zu beschränken, die man rechts und links neben dem Ständer anordnet.

3. Verhalten des Drehstrommotors, wenn der Anker rotiert.

Durch das magnetische Drehfeld, das im Eisenkörper des Ständers erzeugt wird, entstehen in der Läuferwicklung elektromotorische Kräfte und Ströme, die um so größere Stärke besitzen, je schneller sich das Magnetfeld an den Ankerdrähten vorüberbewegt. Zugleich aber entstehen durch die Wechselwirkungen zwischen dem rotierenden Magnetfelde und den Ankerströmen Zugkräfte, die tangential an den Ankerdrähten angreifen. Der Anker beginnt zu rotieren.

Wenn bei Synchronismus die Drehgeschwindigkeit des Läufers gleich der des Drehfeldes ist, bleibt die relative Stellung der Ankerdrähte zu den Kraftlinien des Feldes ungeändert; es werden in den Windungen des Läufers dann überhaupt keine Ströme entstehen; die Zugkraft wird null sein. — In Wirklichkeit wird daher der Anker stets etwas hinter dem Drehfelde zurückbleiben. Die im Ständer erzeugten Kraftlinien schneiden die Ankerdrähte um so öfter, je größer die Geschwindigkeitsdifferenz wird. Die Zugkraft des Ankers ist daher um so größer, je stärkere Ströme im Läufer induziert werden, d. h. je mehr der Anker hinter dem Drehfelde zurück bleibt. In der Praxis beträgt bei voller Belastung die Geschwindigkeitsdifferenz gegen Leerlauf nur 2 bis 7 %, im Mittel 5 %.

Nennen wir die Winkelgeschwindigkeit des Drehfeldes ω_p , die des Ankers ω_s , so nennt man die Größe:

$$\frac{\omega_p - \omega_s}{\omega_p} = \sigma$$

das Schlüpfungsverhältnis des Motors.

Aus dem Vektordiagramm, Fig. 299, das wir schon mehrfach benutzt haben, ergibt sich für die in der Ständerwicklung tätige EMK E_p die Gleichung:

$$E_p^2 = \left(W_p J_p + \frac{m_s}{2} \cdot \omega \cdot M \cdot J_s \cdot \cos \varphi_s \right)^2 + \\ + \left(\frac{3}{2} \omega L_s J_s - \frac{m_s}{2} \cdot \omega \cdot M \cdot J_s \cdot \sin \varphi_s \right)^2 \quad \dots \quad 14)$$

Die in einer Phase des Ankers induzierte EMK E_s ist proportional der Differenz der Geschwindigkeiten des Drehfeldes und des Ankers, dem Koeffizienten der wechselseitigen Induktion und der primären Stromstärke.

oder

$$E_s = \frac{3}{2} \cdot (\omega_p - \omega_s) \cdot M \cdot J_p$$

$$E_s = \frac{3}{2} \cdot \omega_p \cdot \sigma \cdot M \cdot J_p \dots \dots \dots 15)$$

Diese EMK E_s hält gleichzeitig zwei anderen das Gleichgewicht:

1. der Spannung $W_s J_s$, die im Widerstande der Läuferwicklung verbraucht wird,

2. der in der Phase um 90° gegen diese verschobenen EMK e , die durch das sekundäre Drehfeld induziert wird, das zum Läufer die relative Winkelgeschwindigkeit $\omega_p - \omega_s$ hat,

$$e = \frac{m_s}{2} (\omega_p - \omega_s) L_s J_s ;$$

E_s und diese beiden soeben definierten EMKräfte bilden daher wieder ein rechtwinkliges Dreieck, dessen Hypotenuse E_s und dessen Katheten $W_s J_s$ und e sind (Fig. 300).

Aus diesem Dreieck folgt sofort:

$$\cos \varphi_s = \frac{W_s}{\sqrt{W_s^2 + \frac{m_s^2}{4} \cdot \omega_p^2 \cdot \sigma^2 \cdot L_s^2}},$$

$$\sin \varphi_s = \frac{\frac{m_s}{2} \cdot \omega_p \cdot \sigma \cdot L_s}{\sqrt{W_s^2 + \frac{m_s^2}{4} \cdot \omega_p^2 \cdot \sigma^2 \cdot L_s^2}} \dots \dots 16)$$

$$J_s = \frac{\frac{3}{2} \cdot \omega_p \cdot \sigma \cdot M \cdot J_p}{\sqrt{W_s^2 + \frac{m_s^2}{4} \cdot \omega_p^2 \cdot \sigma^2 \cdot L_s^2}} \dots \dots 17)$$

Wenn man diese Werte in Formel 14) einsetzt, erhält man einen ziemlich verwickelten Ausdruck für E_p , aus dem man dann ohne weiteres auch J_p aus lediglich bekannten Größen bestimmen kann.

Das Drehungsmoment D ist gleich der vom Anker aufgenommenen Arbeit $\frac{m_s}{2} \cdot W_s \cdot J_s^2$ dividiert durch die Differenz der Winkelgeschwindigkeiten des magnetischen Drehfeldes und des Läufers $\omega_p - \omega_s$, also:

$$D = \frac{m_s \cdot W_s \cdot J_s^2}{2 (\omega_p - \omega_s)}.$$

Setzt man hierin den Wert für J_s aus Gleichung 17) und den Wert für σ ein, so erhält man:

$$D = \frac{9}{8} m_s \cdot \frac{\omega_p \cdot \sigma \cdot M^2 \cdot W_s}{W_s^2 + \frac{m_s^2}{4} \cdot \omega_p^2 \cdot \sigma^2 \cdot L_s^2} \cdot J_p^2 \dots \dots 18)$$

Diese Formel ist anwendbar, wenn die primäre Stromstärke unveränderlich bleibt. Benutzt man den Wert von J_p aus Gleich. 11) und berücksichtigt, daß:

$$M^2 = \nu^2 \cdot L_p \cdot L_s,$$

so ergibt sich:

$$D = \frac{\frac{3}{2} \cdot \nu^2 \cdot \omega_p \cdot \sigma \cdot W_s}{\omega_p^2 \cdot \left\{ W_s^2 \cdot \frac{3 L_p}{m_s L_s} + \sigma^2 \cdot W_p^2 \cdot \frac{m_s L_s}{3 L_p} + \right.} \cdot E_p^2 \quad 19)$$

$$\left. + 2 \nu^2 \cdot \sigma \cdot W_p \cdot W_s + \frac{3 m_s}{4} \cdot \nu^2 \cdot \sigma^2 \cdot L_p L_s (1 - \nu^2)^2 \right\}$$

Dieser Ausdruck wird verwendet, wenn, wie dies in der Praxis zumeist der Fall ist, mit konstanter primärer Spannung E_p gearbeitet wird.

Man kann übrigens auch J_p aus der für E_s gegebenen Gl. 15) ermitteln und diesen Wert in den Ausdruck für D einsetzen, dann erhält man:

$$D = \frac{m_s}{2} \cdot \frac{W_s}{\omega_p \cdot \sigma \cdot \left[W_s^2 + \frac{m_s^2}{4} \omega_p^2 \cdot \sigma^2 \cdot L_s^2 \right]} \cdot E_s^2 \quad 20)$$

Da in der Praxis die Schlüpfung σ eine sehr kleine Größe (etwa 0,05) ist, und die Selbstinduktion L_s des Läufers aus den früher angegebenen Gründen möglichst klein gemacht wird, kann das Glied:

$$\frac{m_s^2}{4} \cdot \omega_p^2 \cdot \sigma^2 \cdot L_s^2 \text{ vernachlässigt werden.}$$

Dann findet man für D den Näherungswert:

$$D = \frac{m_s \cdot E_s^2}{2 \omega_p \cdot \sigma \cdot W_s} \quad \dots \quad 21)$$

Diese Formel gilt für den der Betrachtung zu Grunde gelegten zweipoligen Motor; bei einem Motor mit p Polpaaren wird das Drehmoment p mal so groß. Beachtet man ferner, daß die effektive EMK

$$\bar{E}_s = \frac{E_s}{\sqrt{2}}$$

ist, so ergibt sich allgemein für den Drehstrommotor mit p Polpaaren für jede Phase:

$$D = \frac{p \cdot m_s \cdot \bar{E}_s^2}{2 \omega_p \cdot \sigma \cdot W_s} \quad \dots \quad 22)$$

Die Leistung A des Motors in Watt ist:

$$A = \omega_s \cdot D \quad \dots \quad 23)$$

Nach Einsetzung des Wertes für D und unter Berücksichtigung, daß $\omega_s = \omega_p (1 - \sigma)$ ist, erhält man:

$$A = \frac{m_s \cdot \bar{E}_s^2}{W_s} p \cdot \left(\frac{1}{\sigma} - 1 \right) \quad \dots \quad 24)$$

Nunmehr ist bloß noch E_p aus den Abmessungen und Wickelungsverhältnissen zu bestimmen.

Wir bezeichnen mit: \mathfrak{B}_L die Anzahl Kraftlinien des Drehfeldes für 1 *qcm* im Luftzwischenraume von der Breite δ , l die Breite des Läufers und Ständers, d den inneren Durchmesser des Ständers, p die Zahl der Polpaare. Mit h_p bezeichnen wir ferner die Dicke des Eisens des Feldmagneten (Ständers) außerhalb der Wickelung, mit h_s die Dicke des Ankereisens (Läufers) innerhalb der Wickelung.

Dann ist die Umfangsgeschwindigkeit v des Drehfeldes in *cm* pro Sekunde:

$$v = \frac{\omega_p \cdot d}{2p} = \frac{\pi \cdot \sim \cdot d}{p} \quad \dots \dots \dots 25)$$

wenn \sim die Periodenzahl des zugeführten Drehstromes ist.

Ferner ist:

$$v_p \cdot E_p = v \cdot \mathfrak{B}_L \cdot N_p \cdot l \cdot 10^{-8} \quad \dots \dots \dots 26)$$

und hieraus:

$$\mathfrak{B}_L = \frac{v_p \cdot p \cdot E_p \cdot 10^8}{\pi \cdot \sim \cdot d \cdot l \cdot N_p} \quad \dots \dots \dots 27)$$

Außerdem gilt für die im Anker induzierte EMK E_s nach den Induktionsgesetzen der Ausdruck:

$$E_s = v_s \cdot v \cdot \mathfrak{B}_L \cdot N_s \cdot l \cdot \sigma \cdot 10^{-8} \quad \dots \dots \dots 28)$$

Hierin sind v_p und v_s Streuungskoeffizienten des Ständers und des Läufers.

Setzt man den für \mathfrak{B}_L gefundenen Wert in die Gleichung für E_s ein, so findet man:

$$E_s = v^2 \cdot \frac{N_s}{N_p} \cdot E_p \cdot \sigma \quad \dots \dots \dots 29)$$

Das ist für $\sigma = 1$ dieselbe Gleichung, die wir schon früher beim Transformator gefunden haben. (S. 258, Gl. 7.)

4. Die Berechnung des Magnetisierungsstromes und des Belastungsstromes.

Ist J_n der Maximalwert, \bar{J}_n der effektive Wert des Nutzstromes eines Drehstrommotors, d. h. der Strom, der ohne Phasenverschiebung die Leistung A (in Watt) des Motors liefern würde, η der Wirkungsgrad, so ist:

$$J_n = \frac{A}{3 \eta \cdot E_p} \quad \dots \dots \dots 30)$$

Der effektive Mittelwert des um 90° gegen J_n in der Phase verschobenen Magnetisierungsstromes sei \bar{J}_μ , dann ist der effektive Belastungsstrom \bar{J}_p :

$$\bar{J}_p = \frac{\sqrt{\bar{J}_\mu^2 + \bar{J}_n^2}}{v^2} \quad \text{und} \quad \cos \varphi_p = \frac{\bar{J}_n \cdot v^2}{\sqrt{\bar{J}_\mu^2 + \bar{J}_n^2}} \quad \dots \dots \dots 31)$$

Der Wert des Leistungsfaktors $\cos \varphi_p$ wird somit vorzugsweise durch den Betrag der Streuung bestimmt.

Für $\sigma = 0$ wird $\omega_p = \omega_s$, dann läuft der Anker synchron, dann aber ist die Induktion auf die Ankerwindung null, und der Strom J_p reduziert sich auf den Magnetisierungsstrom J_μ .

Man erhält dann:

$$J_\mu = \frac{2 E_p}{3 \omega_p L_p} \dots \dots \dots 32)$$

Hierin ist:

$$L_p = \frac{2 \pi N_p^2 \cdot 10^{-9}}{p \cdot \left(\frac{2 \delta}{F_0} + \frac{\lambda_1}{\mu_1 F_1} + \frac{\lambda_2}{\mu_2 F_2} \right)}$$

und zwar sind $F_1 = 0,85 h_1 \cdot l$ und $F_2 = 0,85 h_2 \cdot l$ die tatsächlichen Eisenquerschnitte des Feldes und des Ankers in *qcm*, und $\lambda_1 = \lambda_2 = \frac{d \pi}{2 p}$ näherungsweise die Länge des Kraftlinienweges im Eisen.

Wenn man den magnetischen Widerstand der Kraftlinien im Feld-eisen und Ankereisen gegen den magnetischen Widerstand im Luft-zwischenraume vernachlässigt, kann man in sehr großer Annäherung:

$$L_p = \frac{2 \pi \cdot N_p^2}{10^9 \cdot p \frac{2 \delta}{F_0}} \dots \dots \dots 33)$$

setzen, wobei $F_0 = \frac{\pi \cdot d \cdot l}{3 p}$ ist (*d* Durchmesser, *l* Breite des Ankers, *2 p* Polzahl).

Um den Leerlaufstrom J_0 möglichst klein zu machen, muß somit L_p möglichst groß, d. h. der Luftzwischenraum möglichst klein und F_0 recht groß gemacht werden. Der Größe F_0 kann durch Vergrößerung der Abmessungen des Ankers und Verkleinerung der Polzahl ein beträchtlicher Wert gegeben werden. Der Wunsch, Drehstrommotoren mit kleiner Leerlaufstromstärke zu bauen, führt daher auf verhältnismäßig große Abmessungen und hohe Tourenzahlen, Bedingungen, die in der Praxis zu erfüllen, man zumeist außer Stand sein wird.

Die vom Motor abgegebenen Watt sind gleich $D \cdot \omega_s$. Die vom Motor überhaupt aufgenommenen Watt bestehen aus zwei Teilen, aus den vom Anker aufgenommenen Watt $D \cdot \omega_p$ und der im Ständer in Wärme umgesetzten Energie $3 \cdot W_p \cdot \bar{J}_p^2$. Der Wirkungsgrad η des Motors ist somit:

$$\eta = \frac{D \cdot \omega_s}{3 \cdot W_p \cdot \bar{J}_p^2 + D \cdot \omega_p} \dots \dots \dots 34)$$

oder in Annäherung, wenn man den ersten Teil des Nenners vernachlässigt:

$$\eta = \frac{\omega_s}{\omega_p} = 1 - \sigma \dots \dots \dots 35)$$

Der Wirkungsgrad eines Drehstrommotors hängt somit wesentlich von dem Betrage der Schlüpfung ab und wird um so kleiner, je größer das Schlüpfungsverhältnis σ ist.

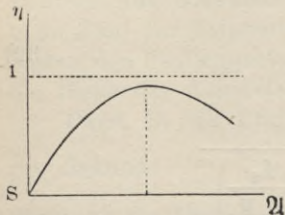


Fig. 304. Abhängigkeit des Wirkungsgrades η eines asynchronen Drehstrommotores von der Belastung.

Die Abhängigkeit des Wirkungsgrades η von der Belastung A stellt die Fig. 304 dar. Man erkennt daraus, daß es eine Belastung, die Normalbelastung, gibt, für die η ein Maximum erreicht, und daß in der Nähe dieses Maximums die Kurve ziemlich flach ist. Sowohl bei nicht ganz voller Belastung, als bei mäßiger Überlastung arbeitet somit der Drehstrommotor

noch unter wirtschaftlich günstigen Bedingungen; sehr wenig belastete oder stark überlastete Motoren arbeiten hingegen sehr unvorteilhaft.

5. Bestimmung des Ständers eines Drehstrommotors.¹⁾

Der eiserne Hohlzylinder, der den Ständer oder den Feldmagneten der meisten Drehstrommotoren bildet, kann mit Ringwicklung, Trommelwicklung oder Polwicklung versehen werden. Ist die Primärspannung E_p hoch, so wird man der Ring- oder Polwicklung den Vorzug geben, weil man dann Kreuzungen von Drähten, die sehr verschiedene Spannung führen, leicht vermeiden kann.

Die Trommelwicklung läßt sich leicht als Stabwicklung ausführen und bietet den Vorteil, daß dann die magnetische Streuung geringer ist. Die Querverbindungen der Stäbe außerhalb des Eisens können, ähnlich wie dies auch bei den Drehstromerzeugern geschieht, (vergl. Fig. 176, S. 224) in verschiedenen Ebenen untergebracht werden, sodaß auch hier die Isolation keine Schwierigkeiten bereitet.

Von Wichtigkeit ist die Wahl der Polzahl $2p$. Diese hängt wiederum wesentlich von der Zahl der Perioden \sim , der Größe des Motors und dem zulässigen Schlüpfungsverhältnis σ ab.

Die Umlaufzahl U des Läufers in der Minute ist:

$$U = \frac{60 \sim}{p} \cdot (1 - \sigma) \dots \dots \dots 36)$$

¹⁾ Nach E. Kolben, ETZ 1893, S. 572 und brieflichen Mitteilungen desselben.

Eine sehr ausführliche Anleitung zur Berechnung von Drehstrommotoren findet man in der vorzüglichen Monographie von J. Heubach, Der Drehstrommotor (Berlin, Springer 1903), Kap. 9, S. 310. Wir konnten diese Arbeit, welche erst während des Druckes unseres Buches erschienen ist, nicht mehr benutzen.

Will man daher mäßige Umlaufszahlen erhalten, so muß die Polzahl 2 p in demselben Maße vergrößert werden, wie die Periodenzahl \sim .

Da nun Motoren mit größerer Polzahl kostspieliger in der Herstellung sind, und der Leerlaufstrom oder Magnetisierungsstrom um so größer wird, und die so schädliche Streuung zunimmt, je mehr Pole man wählt, so ergibt sich daraus, daß es für den Gebrauch von Motoren zweckmäßig ist, mit niedriger Periodenzahl \sim zu arbeiten. Ohne Rücksicht auf die Schlüpfung gibt die nachfolgende Tabelle hierüber Auskunft:

Polzahl 2 p des Motors	Umlaufszahl U des Ankers in 1 Minute	
	bei $\sim = 50$ in 1 Sek.	bei $\sim = 130$ in 1 Sek.
4	1500	3900
6	1000	2600
8	750	1950
10	600	1560
12	500	1300

Daher kommt es, daß man in Europa jetzt fast allgemein mit der Periodenzahl $\sim = 50$ arbeitet, also die niedrigste Wechselzahl benutzt, bei der die Bogenlampen noch nicht in störender Weise flimmern.

Für die magnetische Induktion im Ständereisen haben sich für die Periodenzahl $\sim = 50$ Werte von \mathfrak{B} zwischen 5500 und 4500 Kraftlinien am zweckmäßigsten erwiesen, im Luftzwischenraum δ beträgt δ ann die Kraftliniendichte \mathfrak{B}_L zwischen 4000 und 2000.

Den Ankerdurchmesser d, der auch den inneren Durchmesser des Feldeisens oder die Bohrung $d' = d + 2 \delta$ bestimmt, ermittelt man nach der Formel:¹⁾

$$d = \frac{p \cdot v}{\pi \cdot \sim} \dots \dots \dots 37)$$

Für die Umfangsgeschwindigkeit v wählt man Zahlen zwischen 1500 bis 2500 cm.

δ wird so klein als möglich gewählt; die höchsten Werte dürften bei größeren Motoren 2 mm, bei kleineren 0,5 mm betragen.

Nach Kapp wählt man δ in cm nach folgender Formel:

$$\delta = 0,102 + \frac{1}{1000} d;$$

worin d den Ankerdurchmesser bedeutet.

¹⁾ Heubach gibt a. a. O. S. 293 für d die Formel:

$$d = 14 \sqrt[3,5]{\frac{736 \cdot A}{U \cdot \lambda}}$$

wobei A die Leistung des Motors in Pferdestärken, U die Umdrehungszahl und λ das Verhältnis b/d (Breite zum Durchmesser des Läufers) bezeichnet. Man vergleiche auch die empirischen Formeln von Sengel, ETZ 1903, S. 902.

Die Anzahl der Ständerwindungen N_p pro Phase (bei Trommelwicklung die Drahtzahl) bestimmt man aus der empirischen Formel:

$$N_p = \frac{C \cdot 2 p}{3 \bar{J}_p} \dots \dots \dots 38)$$

wobei C erfahrungsmäßig zwischen 975 und 1200 liegt.

Die primäre Wickelung wird möglichst gleichförmig am Umfange des Feldes verteilt.

Um die der vollen Belastung entsprechende Stromstärke \bar{J}_p bestimmen zu können, bedarf man einer Übersicht über die Werte des Wirkungsgrades η und des Leistungsfaktors $\cos \varphi$ für verschiedene Motorengrößen nach ihrer Leistung A in Pferdestärken. Die Fig. 305 zeigt diesen Zusammenhang auf Grund zahlreicher Erfahrungen.

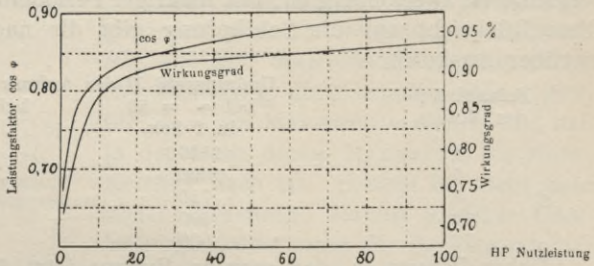


Fig. 305. Abhängigkeit des Leistungsfaktors und Wirkungsgrades η von der Nutzleistung bei vollbelasteten Drehstrommotoren.

Es ist nun die Nutzleistung A bei Dreiphasenmotoren mit Sternschaltung: $A = \sqrt{3} \cdot \eta \cdot \bar{E}_p \cdot \bar{J}_p \cdot \cos \varphi_p$, mit Dreieckschaltung:

$$A = 3 \eta \cdot \bar{E}_p \cdot \bar{J}_p \cdot \cos \varphi_p.$$

Im folgenden wollen wir nur die für Motoren vorzugsweise verwendete Sternschaltung im Auge behalten.

Ist A bekannt und \bar{E}_p gegeben, so kann \bar{J}_p mit Hilfe dieser Ausdrücke unter Berücksichtigung der Fig. 305 bestimmt werden.

Die magnetische Maximalinduktion Φ für jede Phase ist:

$$\Phi = \mathfrak{B} \cdot q,$$

wo q der effektive Eisenquerschnitt ist; sie ergibt sich aus der Formel:

$$\Phi = \frac{\sqrt{2} \cdot \bar{E}_p \cdot 10^8}{2 \pi \sim \cdot N_p} \dots \dots \dots 39)$$

Das Drehfeld hat dann eine maximale Stärke von $\frac{3}{2} \Phi$.

Die maximale magnetische Induktion im Ständereisen wird hiernach:

$$\mathfrak{B} = \frac{3}{2} \cdot \frac{\Phi}{2 q} \text{ oder } \mathfrak{B} = \frac{3}{2} \frac{\Phi}{q},$$

je nachdem man es mit einer Trommel- oder Ringwicklung zu tun hat.

Die nützliche Induktion Φ' ist wegen der Streuung der magnetischen Kraftlinien nur 85 bis 90% von Φ . Es ist $q = 0,85 \cdot h \cdot l$, wenn man 15% für die isolierenden Papierblätter zwischen den Eisenblechen abrechnet.

Bei p Polpaaren wird die effektive Eisenfläche q' eines Poles

$$q' = \frac{0,85 \pi d' \cdot l}{2 p}$$

Da man q kennt, kommt es nunmehr darauf an, h und l zu bestimmen. Es hängt l ab von der Oberfläche, die man den Polen geben muß, um eine passende Kraftliniendichte \mathfrak{B}_L im Luftraume zu erzielen.

Bei einem Trommelanker ist:

$$\mathfrak{B}_L = \frac{3}{2} \cdot \frac{\Phi'}{v' \cdot q'} = \frac{3 \Phi' \cdot p}{v' \cdot \pi \cdot d' \cdot l \cdot 0,85}$$

wobei v' ein Streufaktor ungefähr vom mittleren Betrage 0,8 ist.

Hieraus findet man die Breite des Feldes

$$l = \frac{3 \Phi' \cdot p}{0,8 \pi \cdot d' \cdot \mathfrak{B}_L \cdot 0,85}$$

oder:

$$l = \frac{0,27 p \cdot \bar{E}_p \cdot 10^8}{d' \cdot \sim \cdot \mathfrak{B}_L \cdot N_p} \dots \dots \dots 40)$$

und daraus:

$$h = \frac{q}{0,85 \cdot l} = 0,74 \frac{\mathfrak{B}_L \cdot d'}{p \cdot \mathfrak{B}} \dots \dots \dots 41)$$

h ist die Dicke des Feldeisens, vermindert um die Tiefe der Nuten.

Nunmehr ist nur die gesamte Länge des Kupferdrahtes zu bestimmen, die sich aus der Zahl der Windungen und den Abmessungen der Eisenteile ergibt. Den Querschnitt des Drahtes wählt man nach Maßgabe des Energieverlustes $J_p^2 \cdot W_p$, den man im Kupfer des Ständers zulassen will.

Die Nutenzahl des Ständers wählt man möglichst hoch. Sie muß durch das Produkt aus Anzahl der Phasen und Polzahl teilbar sein.

Die Nutenzahl im Ständer und Anzahl der Löcher im Läufer darf niemals gleich groß sein, da sich gezeigt hat, daß bei gleicher Nutenzahl der Läufer leicht in gewissen Stellungen die Neigung hat nicht von selbst anzugehen, zu kleben, wie die Praktiker sagen.

Gebräuchliche Nutenzahlen für Ständer und Läufer sind;

bei vierpoligen Motoren:	36, 48, 60	Nuten oder Löcher
» sechspoligen	» 54, 72, 90	» » »
» achtpoligen	» 72, 96, 120	» » »

Das Minimum der Nutenzahl für jeden Pol ist 6. Meist wählt man die Nutenzahl des Läufers größer als die des Ständers.

6. Bestimmung des Läufers eines Drehstrommotors.

Wenn der Läufer in Ruhe ist, so ist jede seiner drei Abteilungen der Sitz einer EMK e_s . Die Läuferwicklung arbeitet gewissermaßen, wenn jede Phase aus N_s Windungen besteht, als Transformator mit

dem Umsetzungsverhältnis $N_s : N_p$. Das Drehfeld läuft mit der Geschwindigkeit ω_p um den ruhenden Anker herum, und es ist daher, wenn man zunächst von der Streuung absieht:

$$e_s = \frac{N_p}{N_s} \cdot E_p.$$

Infolge der Streuung aber entsteht nicht die EMK e_s , sondern ein geringerer Wert $\nu \cdot e_s$.

Bei rotierendem Läufer umkreist das Drehfeld den Anker aber nur mit der Geschwindigkeit $\omega_p - \omega_s$, und die in den Läuferwickelungen induzierte EMK E_s reduziert sich daher im Verhältnis der Geschwindigkeiten und wird:

$$E_s = \frac{E_p \cdot (\omega_p - \omega_s) \cdot N_p \cdot \nu}{\omega_p \cdot N_s} \quad 42)$$

Der Ohmsche Verlust in den drei Läuferphasen wird dann:

$$P_s = \frac{3 \cdot E_s^2}{W_s}.$$

Die Leistung des Motors ist aber nach dem, was früher entwickelt worden ist (vergl. Gleichung 24, S. 389):

$$A = P_s \frac{\omega_s}{\omega_p - \omega_s} \cdot p$$

und, wenn man die Werte von P_s und E_s einsetzt:

$$A = \frac{3 \cdot E_p^2 \cdot (\omega_p - \omega_s) \cdot \omega_s \cdot N_p^2 \cdot \nu^2 \cdot p}{W_s \cdot \omega_p^2 \cdot N_s^2} \quad 43)$$

Da $\frac{\omega_s}{\omega_p}$ nur um höchstens 5% von 1 verschieden ist, kann man in erster Annäherung setzen:

$$A = \frac{3 \cdot E_p^2 (\omega_p - \omega_s) \cdot N_p^2 \cdot \nu^2 \cdot p}{W_s \cdot \omega_p \cdot N_s^2} \quad 44)$$

Es zeigt sich, daß A vorzugsweise von der Schlüpfung $\omega_p - \omega_s$, dem Verhältnis der Windungszahlen $N_p : N_s$, dem Widerstand W_s und dem Streuungskoeffizient ν abhängt.

Die Größen A , E_p und $\omega_p - \omega_s$ können als durch die Art des zu berechnenden Motors gegeben betrachtet werden.

Das Verhältnis $\frac{N_s}{N_p}$ wählt man stets so, daß im Läufer niemals lebensgefährlich hohe Spannungen entstehen können.

Die Ampèrewindungszahl des Läufers wird meist kleiner als die des Ständers gemacht.

W_s und ν sind die Größen, deren Betrag man durch geschickte Anordnung des Läufers verändern kann.

W_s macht man so klein als möglich.

Hat man sich über die Größe des Verlustes durch Stromwärme P_s , den man im Läufer zulassen will, entschieden, so bestimmt man

$$W_s = \frac{3 E_s^2}{P_s} \dots \dots \dots 45)$$

und die sekundäre Stromstärke \bar{J}_s

$$\bar{J}_s = \frac{E_s}{W_s} \dots \dots \dots 46)$$

Der in diesen Betrachtungen mit ν bezeichnete Streuungsfaktor ändert sich mit der Belastung, er läßt sich leider weder experimentell noch rechnerisch mit voller Sicherheit voraus bestimmen.¹⁾ Angenähert läßt er sich bei Leerlauf ermitteln, wenn man E_s direkt mißt, was bei Phasenankern mit Schleifringen möglich ist, und das Umsetzungsverhältnis $\frac{N_s}{N_p}$ berücksichtigt.

Will man nicht den Phasenverschiebungswinkel φ_1 groß, den Leistungsfaktor $\cos \varphi_1$ also klein werden lassen, so darf die Nutentiefe nicht groß gewählt werden, weil sonst erhebliche Magnetisierungsströme nötig werden.

7. Das Anlassen größerer Drehstrommotoren mit Zusatzwiderstand in der Läuferwicklung.

Nur kleine Drehstrommotoren versieht man mit reinen Kurzschlußankern; bei größeren Motoren würde die hohe Anlaufstromstärke störend auf das Netz, von dem der Motor gespeist wird, zurückwirken. Man führt daher die Windungen der drei Phasenwickelungen des Läufers zu Schleifringen und schaltet in diese regulierbare

Widerstände ein, die man erst kurz schließt, nachdem der Motor in vollem Gange ist.

Setzen wir voraus, der stillstehende Motor solle mit Vollast angehen. Die Vollast in Watt gemessen möge $A_s = D \cdot \omega_s$ sein.

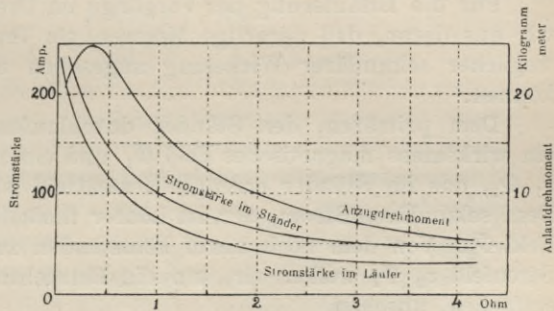


Fig. 306. Abhängigkeit des Anlaufdrehmomentes und der Stromstärken von der Größe des Zusatzwiderstandes.

¹⁾ Für die Vorausberechnung der Streuung hat neuerdings Heubach a. a. O., S. 296 die Wege gezeigt.

Die in den ruhenden Läuferwindungen induzierte EMK war, wie wir weiter oben nachgewiesen haben, $\nu \cdot \frac{E_p \cdot N_s}{N_p}$.

In Ruhe beträgt das Schlüpfungsverhältnis 1, und die gesamte angewendete elektrische Energie wird im Motor und in den Zusatzwiderständen W' zu den Ankerwickelungen in Wärme umgewandelt.

In jedem Läuferstromkreise wird somit in Wärme umgesetzt:

$$\frac{(E_p)^2 \cdot N_s^2 \cdot \nu^2}{N_p^2} \cdot \frac{A_s}{W_s + W'} = \frac{A_s}{3}$$

Daraus folgt:

$$W' = \frac{3 \cdot (E_p)^2 \cdot N_s^2 \cdot \nu^2}{N_p^2 \cdot A_s} - W_s \dots \dots \dots 47)$$

Soll dagegen der Motor mit dem k -fachen der Vollast anlaufen, so wäre in diesem Falle statt A_s die Größe $k \cdot A_s$ im Nenner des ersten Gliedes einzusetzen.

Die vorstehende Fig. 306 zeigt beispielsweise die Abhängigkeit des Anzugdrehmomentes D (in Kilogrammetern) als Funktion des Zusatzwiderstandes W' bei einem 9 pferdigen Drehstrommotor für 50 Perioden, dessen Drehmoment bei Vollast im Betriebe 5 *kg* und bei dem der Ankerwiderstand jeder Phase 0,065 Ohm beträgt. Gleichzeitig sind die Werte der zugehörigen Anlaufstromstärken im Ständer und Läufer mit angegeben.

8. Vorbereitende Erläuterungen zum Heylandschen Diagramm.

Für die Erläuterung der Vorgänge im Drehstrommotor erinnern wir uns daran, daß derartige Motoren als Transformatoren mit beweglicher sekundärer Wickelung angesehen und behandelt werden können.

Dem primären, den Ständer durchlaufenden Strom entspricht ein wirksames magnetisches Feld Φ_1 und ein zugehöriges Streufeld $\tau_1 \Phi_1$, das im Ständer erzeugte Gesamtfeld ist somit $(1 + \tau_1) \cdot \Phi_1$. Dem sekundären Strom, der im Läufer fließt, entspricht ein anderes Feld Φ_2 . Von dem noch hinzu kommenden zusätzlichen sekundären Streufeld $\tau_2 \Phi_2$ wollen wir, um die Betrachtung möglichst zu vereinfachen, absehen.

Das im Ständer erzeugte magnetische Primärfeld Φ_1 und das im Läufer erzeugte Sekundärfeld Φ_2 haben verschiedene Phase und setzen sich daher geometrisch zusammen zu dem resultierenden Felde F (in Fig. 307 Diagonale OD). Das sekundäre Feld Φ_2 und das primäre

¹⁾ τ_1 heißt Heylandscher Streuungskoeffizient, $1 + \tau_1 = \nu_1$ ist identisch mit dem früher von uns verwendeten Hopkinsonschen Streuungskoeffizienten. (Vergl. Gleichstromtechnik, Kap. XX, 6, S. 409.)

als das Felddreieck. Das Dreieck CED ist ähnlich DOH. Die Seiten von DOH sind aber, wie die Fig. 307 zeigt, die Felder Φ_1 , Φ_2 und F, und da man in der Wechselstromtechnik nur mit verhältnismäßig niedrigen magnetischen Felddichten arbeitet, können die Felder den magnetomotorischen Kräften, d. h. den Ampèrewindungszahlen und diese den Stromstärken proportional gesetzt werden.

Es ist somit nach einem passend gewählten Maßstabe DC dem Primärstrom, ED dem Sekundärstrom und CE dem das gemeinsame Feld F erzeugenden Magnetisierungsstrom angenähert proportional. Das Dreieck CED wird daher Stromdreieck genannt.

Die Größen CG und CO haben nunmehr beim Drehfeldmotor eine besondere Bedeutung.

Befindet sich der Läufer bei Leerlauf in Synchronismus mit dem rotierenden Drehfeld des Ständers, so schneiden die Läuferwindungen bei ihrer Bewegung keine Kraftlinien; bei synchronem Laufe kann somit in den Läuferwindungen keine EMK induziert werden; ebenso muß der von der sekundären EMK im Läufer verursachte Strom i_2 null werden. Die Punkte D und E fallen somit bei Leerlauf im Synchronismus mit G zusammen, das Diagramm reduziert sich dann auf die gerade Linie CGO.

CG ist demnach der Magnetisierungsstrom bei Synchronismus, d. h. der Magnetisierungsstrom bei Leerlauf.

Wenn wir den Motor mehr und mehr belasten, nimmt die Läuferstromstärke i_2 immer mehr zu, der Punkt D wandert auf dem Kreise immer höher hinauf. Wenn wir endlich den Läufer ganz festhalten, fällt D mit O zusammen. CO ist demnach der Magnetisierungsstrom bei festgehaltenem Läufer oder bei Kurzschluß. CG und CO sind demnach zwei Größen, die bei einem fertigen Drehstrommotor durch Versuche leicht ermittelt, bei einem im Entwurfe vorliegenden Motor rechnerisch gefunden werden können.

Den Primärstrom i_1 können wir auch als aus zwei Teilen bestehend ansehen. Der eine Teil ist nämlich der Magnetisierungsstrom i_0 , der auch bei Leerlauf vorhanden ist; der andere Teil rührt von der sekundären Belastung her und mag $u \cdot i_2$ sein.

Die Bedeutung des Faktors u kann aus dem Diagramm verstanden werden. In dieser Figur ist Dreieck OHC ähnlich GDC. OHC besteht aus den Feldern Φ_2 , F_1 und $\Phi_1 (1 + \tau_1)$. In einem anderen Maßstab stellt daher auch das Dreieck GDC dieselben Felder dar. Denken wir uns wieder die Felder durch die magnetomotorischen Kräfte ersetzt, was bei den in der Wechselstromtechnik üblichen geringen Felddichten näherungsweise zulässig ist, so ist CD proportional mit $(1 + \tau_1) \Phi_1 = (1 + \tau_1) i_1 \cdot n_1 \cdot k_1$, wenn i_1 die primäre Stromstärke, n_1 die primäre Windungszahl, k_1 den Spulenfaktor der Ständer-

wicklung bedeutet. Ebenso ist GD proportional mit $\Phi_2 = i_2 \cdot n_2 \cdot k_2$, wenn i_2 die Stromstärke, n_2 die Windungszahl, k_2 den Spulenfaktor der Läuferwicklung bezeichnet. Dividieren wir die Längen aller Seiten des Dreieckes CGD durch $(1 + \tau_1) \cdot n_1 \cdot k_1$, so stellt CD in einem neuen Maßstab den im Ständer fließenden Strom i_1 ,

$$DG = \frac{n_2 \cdot k_2}{(1 + \tau_1) \cdot n_1 \cdot k_1} \cdot i_2 = u \cdot i_2$$

den auf die Ständerwicklung reduzierten Läuferstrom dar.

Die Größe
$$u = \frac{n_2 \cdot k_2}{(1 + \tau_1) n_1 \cdot k_1}$$

wird nach Blondel¹⁾ der Umsetzungsfaktor genannt.

In Fig. 307 stellt somit OA in irgend einem Maßstab den Strom i_1 im Ständer, GD den auf die Ständerwicklung im Umsetzungsverhältnis reduzierten Läuferstrom $u \cdot i_2$, CG den Magnetisierungsstrom i_0 bei Leerlauf und OC den Magnetisierungsstrom bei Kurzschluß (bei festgehaltenem Läufer) i_k vor.

Die Zugkraft, die am Umfange des Motors angreift, ist das Produkt $F \cdot i_2$ aus dem Nutzfelde F und dem Läuferstrom i_2 . Die Zugkraft ist somit proportional dem Inhalte des rechtwinkligen Dreieckes GOD; denn OD ist F und GD ist gleich $u \cdot i_2$ und OD und DG sind aufeinander senkrecht. Das Dreieck GOD besitzt aber die Basis OG und diese, die Differenz zwischen i_k und i_0 , ist konstant. Ist aber die Basis eines Dreieckes unveränderlich, so kann sein Inhalt durch die Höhe DZ auf dieser Basis gemessen werden. DZ mißt somit die Zugkraft des Motors, oder was für den Beharrungszustand dasselbe ist, die Belastung.²⁾

9. Das Heylandsche Diagramm des Drehstrommotors.

Um einen raschen Einblick in die gesamte Wirkungsweise eines asynchronen Motors zu gewinnen, ist die graphische Methode trefflich geeignet. Unter den verschiedenen Diagrammen, die für diesen Zweck hergestellt worden sind, hat sich in der Praxis besonders das Kreisdiagramm von Heyland eingebürgert. Wir geben im folgenden eine kurze Darstellung desselben.³⁾

Die Wechselstrom- und Drehstrommotoren können als Transformatoren betrachtet werden.⁴⁾ Bei einem Transformator hängen

¹⁾ Blondel, Eclairage électrique 1903, Heft 17.

²⁾ Weiterhin werden wir sehen, wie auch die Verluste des Motors berücksichtigt werden können. Vergl. den folgenden Abschnitt.

³⁾ Nach Heyland in: E. Voit, Sammlung elektrotechnischer Vorträge, Band II.

Ein noch etwas verwickelteres, aber auch genaueres Diagramm gibt Heubach in seinem Werke: Der Drehstrommotor.

⁴⁾ Ein Drehstrommotor kann als ein Transformator mit starker Streuung

nun der primäre Strom J_p , der sekundäre Strom J_s und der Magnetisierungsstrom J_μ derart zusammen, daß die gegen E_p in der Phase verschobene Stromstärke J_p die Hypotenuse eines rechtwinkligen Dreieckes aus J_s und J_μ ist (vergl. Fig. 308).

Magnetfelder treten am Motor drei auf: das primäre Feld oder Hauptfeld K_p , welches auf der Primärspannung E_p senkrecht steht; das Streufeld K_s hat dieselbe Phase wie der primäre Strom J_p . Senkrecht hierzu steht das Läuferfeld K_s . (Vergl. Fig. 309.)

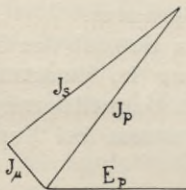


Fig. 308. Diagramm der Stromstärken beim Drehstrommotor.

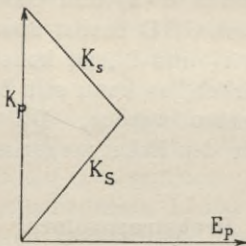


Fig. 309. Diagramm der Magnetfelder beim Drehstrommotor.

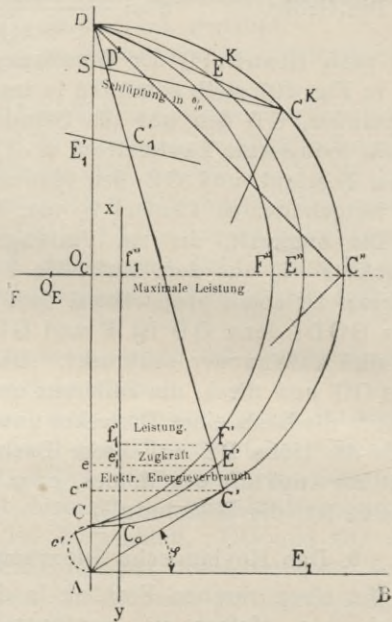


Fig. 310. Heylands Kreisdiagramm für den Drehstrommotor.

Da K_s und K_s aufeinander senkrecht stehen, ist für ein konstantes, der Primärspannung E_p proportionales Hauptfeld der geometrische Ort der Dreiecksspitzen für verschiedene Betriebsverhältnisse ein Halbkreis, der durch die Endpunkte von K_p hindurch geht.

In der vorstehenden Fig. 310 ist nun AD eine dem Primärfeld K_p proportionale Größe; AC' sei J_p ; da das Streufeld K_s proportional J_p und mit diesem phasengleich ist, so ist AC' auch proportional K_s .

(wegen des Luftspaltes zwischen Ständer und Läufer) angesehen werden, dessen sekundäre Wicklung beweglich ist. Der Synchronismus entspricht dem Transformator mit offenem sekundären Stromkreise; dem Stillstand des Läufers entspricht Kurzschluß der sekundären Wicklung.

Nun ist aber K_s proportional dem Quotienten aus J_p und dem magnetischen Widerstand w_s der Kraftlinien des Streufeldes, somit AC' proportional: $\frac{J_p}{w_s}$. Ferner ist $\overline{c'C'} = J_s$.

Die Punkte c' und C' liegen je auf einem Halbkreise, da sowohl $\sphericalangle A c' C$ als $\sphericalangle C C' D$ beide stets 90° sein müssen.

Der Primärstrom J_p erreicht nun sein Maximum, wenn C' auf D fällt; AD ist daher der Kurzschlußstrom des Motors bei Stillstand des Läufers, der leicht bestimmt werden kann.¹⁾

In diesem Falle ist dann:

$$K_p = K_s \text{ und } K_s \text{ ist proportional } \frac{J_p}{w_s} \text{ folglich auch proportional } \frac{AD}{w_s}.$$

Es wird dagegen J_p ein Minimum, wenn $\overline{AC'} = AC$ ist, dann ist $J_p = J_\mu = AC$ und

$$K_p = \frac{J_\mu}{w_s} \text{ und proportional } \frac{AC}{w_s},$$

wenn man mit w_s den magnetischen Widerstand des Läuferfeldes bezeichnet.

Aus diesen Betrachtungen folgt:

$$\frac{AD}{AC} = \frac{w_s}{w_s} = \frac{\text{magnetischer Widerstand des Streufeldes}}{\text{magnetischer Widerstand des Läuferfeldes}}$$

Diese Größe läßt sich aus dem Entwurfe des Motors näherungsweise ermitteln.

Den Spannungsabfall infolge der Erzeugung der Stromwärme $J_p^2 \cdot W_p$ in der primären und $J_s^2 \cdot W_s$ in der sekundären Wicklung berücksichtigt Heyland auf folgende Weise.

Der Ohmsche Abfall im Ständer verursacht eine Verminderung der primären EMK E_p und damit eine proportionale Verkleinerung des Primärfeldes K_p und ebenso eine proportionale Verminderung des Sekundärfeldes K_s .

Es wird also vom Sekundärfelde DC' ein Stück $C'E'$ abgezogen, das proportional dem primären Ohmschen Spannungsverluste ist und ferner ein Stück $E'F'$, das proportional dem Ohmschen Spannungsabfall im Läuferstromkreise ist.

Dann liegen alle Punkte E' wieder auf einem zweiten Halbkreise mit dem Mittelpunkte O_E und alle Punkte F' auf einem dritten Halb-

¹⁾ Vielfach kann man nicht direkt die Stärke des Kurzschlußstromes messen, weil sonst die Ständerwickelungen verbrennen würden. Man macht Versuche für verschiedene Spannungen E_p und bestimmt die zugehörige Kurzschlußstromstärke. Trägt man die beobachteten Werte des Kurzschlußstromes als Ordinaten, die zugehörigen Spannungen als Abszissen auf, so findet man eine Gerade, aus deren Verlängerung man dann die Stärke des Kurzschlußstromes für die Betriebsspannung E_p leicht ermitteln kann.

kreise mit dem Mittelpunkte O_F . Die Radien aller drei Kreise sind dieselben, gleich $\frac{1}{2} DC$.

Das Heylandsche Diagramm gestattet nunmehr die Betriebsverhältnisse des Motors vollständig zu übersehen.

Die vom Motor aufgenommene elektrische Energie

$$\mathcal{V}_3 \cdot E_p \cdot J_p \cdot \cos \varphi_p$$

ist proportional der auf AD senkrechten Strecke $\overline{C'e''}$.

Die Zugkraft ist bekanntlich proportional dem Produkte aus dem Ankerfelde und der sekundären Stromstärke, somit proportional dem Streckenprodukte $\overline{ED} \cdot \overline{C'e'}$, dies aber ist proportional $\overline{E'e}$.

Dieser Wert ist aber nur die theoretische Zugkraft, da die Eisenverluste und die Lagerreibung noch nicht berücksichtigt sind. Diese sind für alle Betriebsverhältnisse die gleichen und werden von Heyland dadurch in Rechnung gestellt, daß er eine zu AD parallele Linie xy zieht. Den Abstand ee_1 dieser Parallelen macht er diesen Verlusten proportional.

Dann ist $E'e_1$ der nützlichen Zugkraft proportional.

Die Leistung des Motors ist der Strecke $F'f_1$ proportional.

Die Schlüpfung ist dem Quotienten $\frac{C'C}{E'D}$ proportional.

Trägt man nun an einen beliebigen Punkt E'_1 den Winkel $\sphericalangle DE'_1C'_1 = \sphericalangle DE'C$ an, so ist $E'_1C'_1$ proportional $\frac{C'C}{E'D}$, also eine der Schlüpfung proportionale Strecke.

Nun ist die Schlüpfung 100%, wenn die Leistung null wird, d. h. wenn der Punkt F' mit D zusammenfällt. Es kommt der Punkt C' nach C_k zu liegen, wenn DC_k Tangente an den durch F' gezogenen Kreis wird.

Zieht man nun durch C^k eine Parallele zu $E'_1C'_1$, die AD in S schneidet, so ist SD' proportional $E'_1C'_1$. Teilt man also SC^k , welches 100% Schlüpfung entspricht, in 100 Teile, so ist in dem so gewonnenen Maßstabe SD' die Schlüpfung in Prozenten.

In den guten elektrotechnischen Fabriken wird für jeden angefertigten asynchronen Drehstrommotor das Heylandsche Kreisdiagramm konstruiert.

Man mißt zu dem Zwecke die primäre Stromstärke bei Leerlauf des Motors, das ist die Strecke $\overline{AC_0}$ und mit Hilfe des Wattmeters eines Strommessers und eines Spannungsmessers aus den scheinbar abgegebenen und wirklich vom Motor aufgenommenen Watt den Winkel BAC_0 .

Ferner mißt man bei ruhendem Läufer die Stromstärke, dies ist die Kurzschlußstromstärke $J_k = AC_k$ und ferner mit Hilfe des Wattmeters den Winkel BAC_k .

Aus dem Ohmschen Widerstand der primären Wickelung findet man die Strecke $\overline{C_k E_k}$, welche proportional $J_k \cdot W_p$ ist.

Damit können nunmehr die drei Mittelpunkte O_C, O_E, O_F gefunden, und für gegebene Betriebsverhältnisse die gewünschten Größen konstruiert werden.

Das Verhältnis der Stromstärke bei Leerlauf zur Stromstärke bei Stillstand ist ein Maß für die Größe der Gesamtstreuung. Die Streuung ist somit bei dem Heylandschen Diagramm berücksichtigt.

Für die elektrische Energie als Abszisse hat Heyland die Kurven aufgestellt, welche entstehen, je nachdem man den aufgenommenen Strom J_p , die Leistung, die Zugkraft, die Schlüpfung oder den Leistungsfaktor $\cos \varphi_p$ als Ordinaten benutzt.

Wir erkennen aus dem Heylandschen Diagramm Fig. 310 ferner, daß der elektrische Energieverbrauch eines Motors nicht ins Unbestimmte wächst, sondern in $C''' O_c$ ein Maximum erreicht. Die zugehörige Größe $E'' O_c$ beziehentlich $E'' f''_1$ ist daher ein Maß für die Überlastungsfähigkeit des Motors, welche identisch ist mit seiner Anzugskraft.¹⁾

Im allgemeinen baut man die Motoren so, daß sie das Doppelte der normalen Last noch bequem durchzuziehen imstande sind, und das erreicht man dadurch, daß man bei möglichst niedriger Streuung (ν etwa 0,97) den Magnetisierungsstrom J_μ etwa gleich $\frac{1}{3}$ des Arbeitsstromes J_p bei voller Belastung macht.

10. Der asynchrone Drehstrommotor als Stromerzeuger.

Wird der Läufer eines Drehstrommotors durch eine Antriebsvorrichtung rascher als das Drehfeld gedreht, bewegt er sich also mit einer größeren Geschwindigkeit als dem Synchronismus entspricht, so nimmt der Ständer nicht mehr Strom aus den Zuführungsleitungen auf, sondern gibt elektrische Energie an das Verteilungsnetz, an welches der Motor angeschlossen ist, zurück.²⁾

In Fig. 310 kommt alsdann der links von AD gelegene Teil des Heylandschen Kreises in Betracht.

¹⁾ Man darf nicht übersehen, daß beim Heylandschen Diagramm durch lediglich näherungsweise Berücksichtigung des Widerstandes der Ständerwicklung eine gewisse Ungenauigkeit vorliegt. Dieselbe gewinnt jedoch nur bei ganz kleinen Motoren erhebliche Bedeutung, bei welchen der Spannungsverlust in der Ständerwicklung verhältnismäßig groß ist. Meist beträgt jedoch der Verlust im Ständer nur 2 bis 6% des Wattkonsums. Für Motoren von einigen Pferdestärken an bis zu solchen beliebiger Größe kann daher das Heylandsche Diagramm ganz unbedenklich verwendet werden. Für sehr kleine Motoren und besondere Fälle muß man sich des verwickelteren Heubachschen Diagramms bedienen. Vergl. Heubach, Der Drehstrommotor, S. 106.

²⁾ Diese Tatsache ist schon 1893 von Danielson beobachtet worden.

Fig. 311 stellt z. B. in der rechten Hälfte die Abhängigkeit des Drehungsmomentes D eines Motors von der Schlüpfung $\omega_p - \omega_s$ dar.

Die ausgezogene Linie gilt für einen Motor ohne Streuung; die gestrichelte Linie deutet an, in welcher Weise die Verhältnisse durch die unvermeidliche Streuung der magnetischen Kraftlinien, durch die Wirksamkeit des Koeffizienten ν , geändert werden.

Der links untenstehende zweite Teil der Fig. 311 zeigt, daß für negative Werte von $\omega_p - \omega_s$ sich die rechts stehende Kurve, nur nach unten verlegt, wiederholt, und negativen Werten von $\omega_p - \omega_s$ auch negative Werte des Drehungsmomentes D entsprechen. Jeder asynchrone Motor kann also zu einer Strom liefernden Maschine

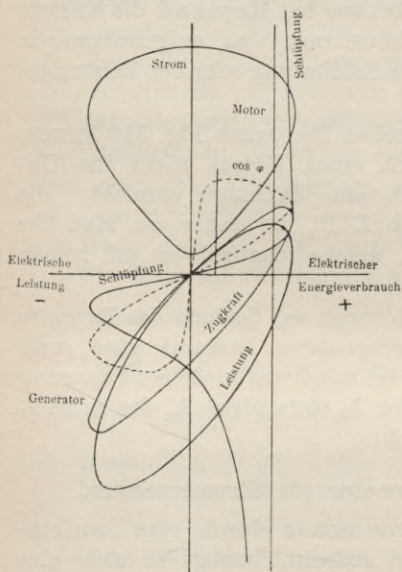


Fig. 312. Strom, Zugkraft, Leistung, Schlüpfung, Leistungsfaktor eines Drehstrommotors als Funktion der aufgenommenen oder abgegebenen elektrischen Energie.

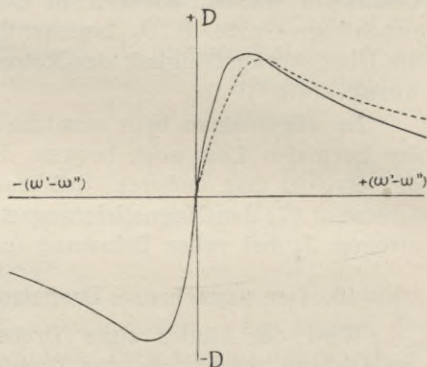


Fig. 311. Abhängigkeit des Drehungsmomentes asynchroner Drehstrommotoren von der Schlüpfung.

werden, sobald sein Läufer mit höherer Umdrehungszahl ω_s gedreht wird, als der Umlaufzahl ω_p des magnetischen Feldes im Ständer entspricht.

Durch Steigerung der Geschwindigkeit des Läufers kann man übrigens nicht beliebig große Energiemengen in das Netz zurückliefern, sondern bei einem bestimmten Werte der negativen Schlüpfung, die etwa 10 bis 20% über dem Synchronismus liegt, erreicht dieser Wert ein Maximum. Dasselbe zeigt auch die Fig. 312.

Damit eine negative Schlüpfung möglich ist, muß selbstverständlich doch ein magnetisches Drehfeld im Ständer vorhanden sein; dies ist aber nur so lange der Fall, als der Motor wirklich an ein mit Drehstrom gespeistes Netz angeschlossen ist. Der asynchrone Dreh-

strommotor kann daher ohne besondere Hilfseinrichtungen niemals als selbständiger Drehstromerzeuger verwendet werden, sondern er kann nur im Anschluß an ein Verteilungsnetz, das mit Drehstrom gespeist wird, zur Stromlieferung mit herangezogen werden.

Eine derartige Maschine, welche Strom in das Verteilungsnetz liefert, wird ein Asynchrongenerator genannt und es hat ganz den Anschein, als ob diese Asynchrongeneratoren in naheliegender Zeit eine erhebliche Bedeutung in der Praxis gewinnen sollten.¹⁾

Ein Asynchrongenerator kann ohne Rücksicht auf seine Periodenzahl in einem Netze ein- oder ausgeschaltet werden, ohne daß dadurch Störungen eintreten werden. Synchrongeneratoren hingegen dürfen bekanntlich nur eingeschaltet werden, wenn Periodenzahl, Spannung und Stromphase völlig mit der des mit Wechselstrom betriebenen Netzes in Übereinstimmung sind. Asynchrone Generatoren stellen daher an die Gleichförmigkeit des Ganges ihrer Antriebsmaschinen viel geringere Anforderungen, als dies bei gewöhnlichen Wechselstrommaschinen oder Mehrphasenmaschinen der Fall ist.

Man kann aber auch asynchrone Generatoren zu einem Synchrongenerator in Serie schalten und ohne, daß sie genau gleiche Periodenzahl haben, zur Spannungserhöhung verwenden.

Im 25. Kap., Abschn. 7 wird gezeigt, auf welche Weise Heyland die aynchronen Generatoren kompensiert und für verschiedene Belastung, induktive und induktionsfreie, kompondiert hat, sodaß sie konstante Spannung liefern, und sie dadurch gleichzeitig zu selbst-erregenden Maschinen gemacht hat.

Den wattlosen Strom, der zur Erzeugung des Drehfeldes nötig ist, kann aber der Asynchrongenerator nicht liefern, wenn sein Läufer ein normaler mit vollkommen in sich geschlossener Wicklung ist. Dies kann jedoch geändert werden, wenn man dem Motor noch von einer anderen Quelle EMK zuführt, wenn man z. B. wie dies Heyland getan hat (vergl. Kap. 25) den Läufer an einen Kollektor anschließt. Durch den Kollektor kann man dann passend transformierten Hauptstrom zuführen und dadurch diese Maschine selbsterregend machen.

Da solche Maschinen nur mit sehr geringer Schlüpfung arbeiten, können sie dann auch als Taktgeber an Stelle der eigentlich sonst hierzu erforderlichen Synchrongeneratoren in Wechselstrom- oder Drehstromzentralen verwendet werden.

¹⁾ Eine vorzügliche Darstellung der Theorie solcher Maschinen hat Cl. Feldmann in seiner Habilitationsschrift: Asynchrone Generatoren für ein- und mehrphasige Wechselströme (Berlin, J. Springer, 1903) gegeben.

23. Kapitel.

Beschreibung ausgeführter Drehstrommotoren nebst Zubehör.

1. Drehstrommotoren der Allgemeinen Elektrizitäts - Gesellschaft.

Die Fig. 313 stellt einen 50 pferdigen Drehstrommotor der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft in Berlin dar. Der ruhende

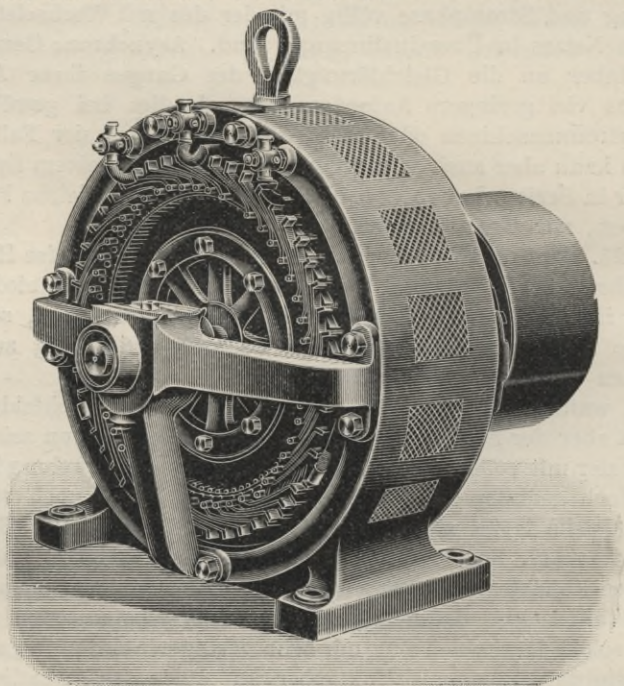


Fig. 313. Größerer Drehstrommotor der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft.

Feldmagnet oder Ständer enthält 102 Kupferstäbe, von denen je 34 zu einer Phase des Drehstromes gehören. Jede Phase bildet eine 8 polige Trommelwicklung.

Denkt man sich die Stäbe von 1 bis 102 numeriert und nimmt an, daß der Strom I in 102 eintritt, so geht man jedesmal um 13 Stäbe entgegen der Uhrzeigerrichtung zurück und umkreist auf diese Weise den Zylinderumfang $4\frac{1}{3}$ mal. Man gelangt dann, nachdem man 34 Stäbe

verbunden hat, zum Stab 83, der mit dem Kerne des Ständers leitend verbunden wird. Den zweiten Strom II führt man in den Stab 34, den dritten III in den Stab 68 ein und verfährt im übrigen wie vorher.

Der bei dieser Maschine verwendete Läufer besteht aus zwei übereinander liegenden Reihen von Kupferstäben, die durch einen Kupferring verbunden sind. Durch drei am oberen Teile des Eisengestelles angebrachte, von diesem isolierte Klemmen werden die drei zum Betriebe erforderlichen Wechselströme zugeführt.

Die Umlaufzahl zwischen Leerlauf und Vollast unterscheidet sich bei diesem Motor nur um 4 bis 5 %.

Für kleinere Arbeitsleistungen stellt die Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft meist die Feldwicklung nach Art des Grammeringes her und schaltet die einzelnen Abteilungen bei verkettetem Drehstrom in der Weise, wie dies in Fig. 314 schematisch dargestellt ist. Die Fig. 315 zeigt das Äußere eines solchen kleineren Drehstrommotors nach Entfernung der einen durchlöcheren Seitenplatte.

Soll bei derartigen Motoren die Drehrichtung geändert werden, so werden

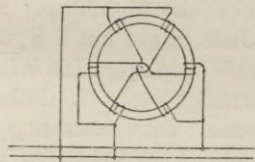


Fig. 314. Schaltung bei kleinen Drehstrommotoren.

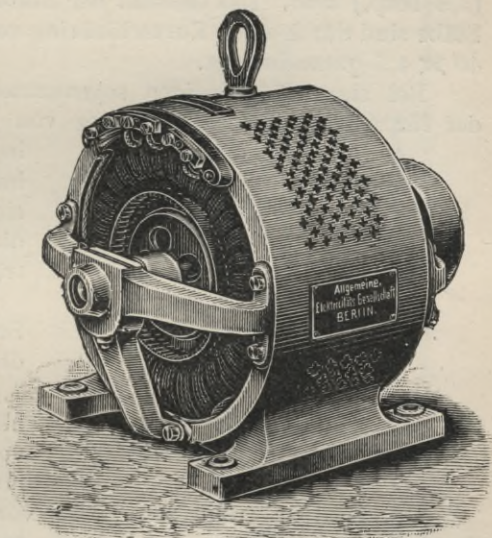


Fig. 315. Kleiner Drehstrommotor der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft.

zwei Stromzuführungen miteinander vertauscht. Für ganz kleine Motoren kann man sich eines einfachen Umschalters bedienen, wie er durch die Zeichnung in Fig. 316a und 316b schematisch erläutert wird. Dreht man den Schalter um 180° , so werden die Leitungen 1 und 2 vertauscht, und der Anker dreht sich in entgegengesetzter Richtung.



Fig. 316a.



Fig. 316b.

Umschalter für ganz kleine Drehstrommotoren.

Über die Wicklungsverhältnisse eines 6 pferdigen Drehstrommotors mit Grammeringwicklung, der genau der Fig. 315 entspricht, dessen

Anker 950 Umdrehungen in der Minute macht, wenn er mit Drehstrom von 50 Perioden in einer Sekunde betrieben wird, und bei dem der Spannungsunterschied zwischen je zwei Leitungen 190 Volt beträgt, hat uns die Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft folgende Angaben freundlichst zur Verfügung gestellt.

Im Ständer oder in dem Gehäuse ist Ringwicklung verwendet, die Schaltung ist offen (Sternschaltung). Die Gesamtzahl der Löcher (respektive Spulen) beträgt 72. In jedem Loche liegen sieben Drähte, deren Dicke gleich 3,5 (isoliert 3,9) *mm* ist. Der Widerstand einer Phase ist gleich 0,242 Ohm; das Kupfergewicht der Ständerwicklung ist 28,5 *kg*.

Der Läufer oder Anker besitzt 100 Stäbe, die 5,0 *mm* dick (5,5 *bsp.*) sind. Das Gewicht der Stäbe beträgt nur 3,5 *kg*. Diese Stäbe sind durch einen Kurzschlußring verbunden, dessen Querschnitt $40 \times 4,5$ *qmm* beträgt.

Bei einem 75 pferdigen sogenannten Hochspannungsmotor, der für eine verkettete Spannung von 4750 Volt und 50 Perioden in einer Sekunde bestimmt ist, hat die Bohrung des Ständers einen Durchmesser von 50 *mm*; die Breite des Feldeisens beträgt 250 *mm*.

Das Feldeisen des Ständers trägt 150 Löcher, deren jedes 30 Drähte von 1,6 *mm* Dicke (2,0 *bsp.*) enthält. Jede Phase hat 5 Spulen von 150 Windungen. Die Wickelung erzeugt somit 10 Pole.

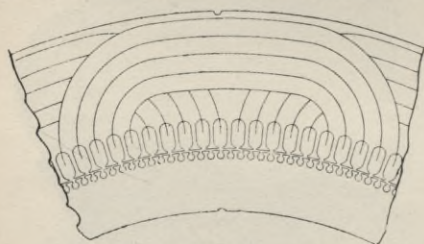


Fig. 317.
Wicklung des Ständers eines Drehstrommotors der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft.

Der Läufer trägt 252 Stäbe von 6 *mm* Durchmesser, die durch Endverbindungen aus Messing zu 126 einzelnen Schleifen verbunden sind.

Die Verbindung der in den Nuten gelegenen Spulen des Ständers erläutert die obenstehende Fig. 317.

Für kleinere Leistungen verwendet die A. E.-G. Kurzschlußanker, für größere Motoren Phasenanker. Bei vielen ihrer Motoren werden auch sogenannte Stufenanker benutzt. Diese Stufenanker tragen zwei Wickelungen. Die eine Wickelung mit größerem Widerstand wird beim Anlaufen verwendet. Wenn der Anker dann nahezu seine volle Umdrehungszahl erreicht hat, wird diese Wickelung mittels eines Hebels ausgeschaltet und die andere, die eigentliche Arbeitswicklung mit ganz geringem Kurzschlußwiderstand dafür eingeschaltet. Die Anlaufstromstärke kann auf diese Weise erheblich verkleinert werden.

2. Drehstrommotoren der Maschinenfabrik Oerlikon.

Die Maschinenfabrik Oerlikon verwendet für größere Drehstrommotoren, von 12 Pferdestärken aufwärts, meist Phasenanker,

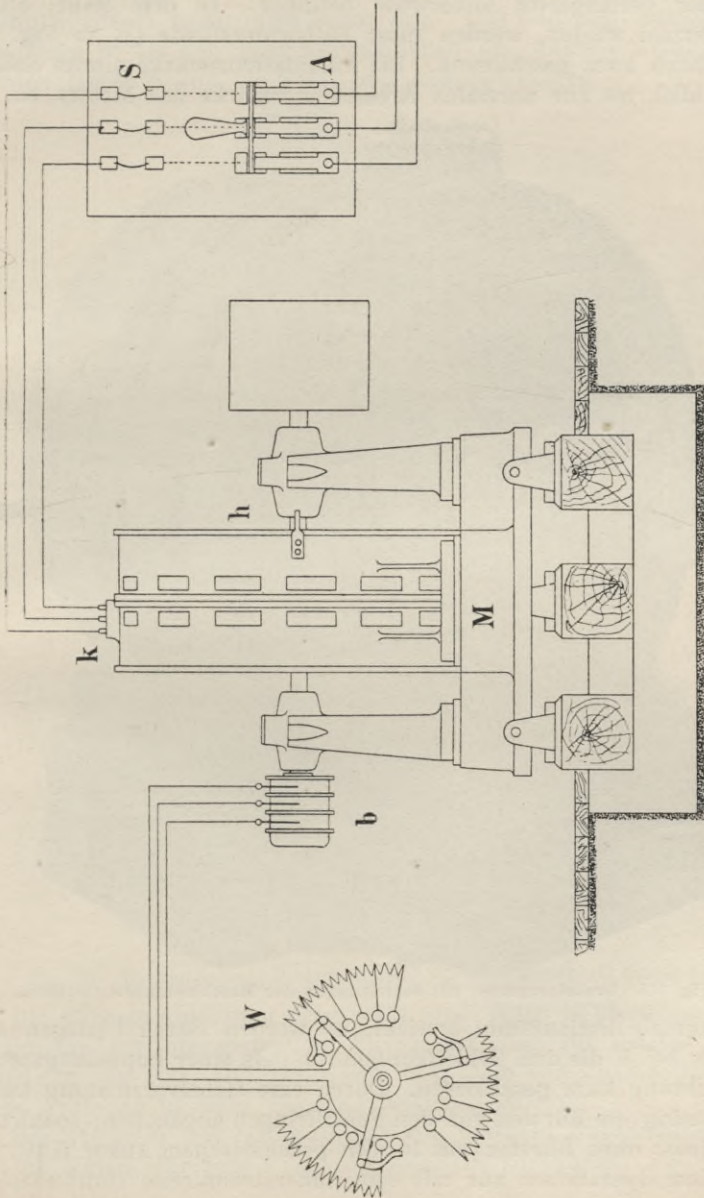


Fig. 318. Anlaufvorrichtung für größere Drehstrommotoren mit Phasenanker.

wie wir einen solchen auf S. 359, Fig. 285, abgebildet haben, und schaltet beim Anlassen in den Ankerstromkreis Widerstände ein. Zu dem Zwecke endet die Ankerwicklung an drei Schleifringen, die sich auf der verlängerten Ankerwelle befinden. In dem Maße, als die Tourenzahl wächst, werden diese Hilfs Widerstände (W in Fig. 318) allmählich kurz geschlossen. Die Anlaufstromstärke nimmt dadurch allmählich bis zur normalen Arbeitsstromstärke des Motors zu. Ist

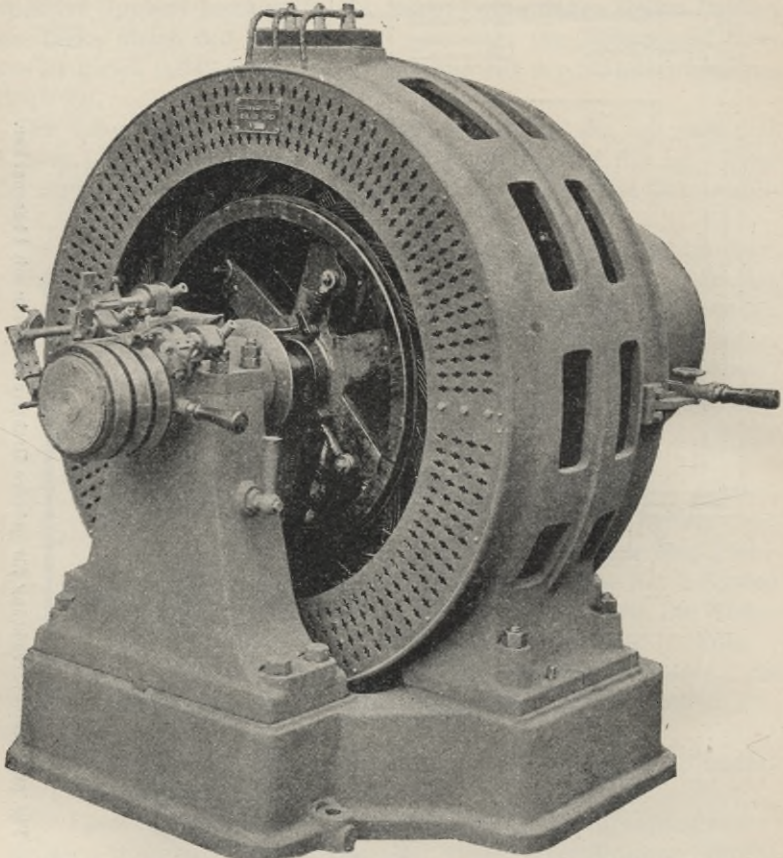


Fig. 319. Drehstrommotor mit Schleifringen der Maschinenfabrik Oerlikon.

die normale Umlaufzahl erreicht, so werden durch Umlegen eines Hebels bei h die drei Schleifkontakte mittels einer kuppelungsartigen Vorrichtung kurz geschlossen. Durch eine Hebelvorrichtung werden gleichzeitig die Bürsten von den Schleifringen abgehoben, sodaß dann der Motor ohne Bürsten mit in sich geschlossenem Anker läuft. Da alle diese Operationen nur mit dem Ankerstromkreise stattfinden und

in diesem nur Strom von niedriger Spannung fließt, so ist keinerlei Gefahr oder lebhaftere Funkenbildung mit diesen Hantierungen am Läufer verbunden.

Die Abbildung 318 stellt einen solchen für Betrieb durch hochgespannten Strom bestimmten Motor dar. Das Bild zeigt sowohl die Schleifringe *b*, als den zum Kurzschließen der Ankerwicklung bestimmten Hebel *h* und die Feld- und Ankerwicklung.

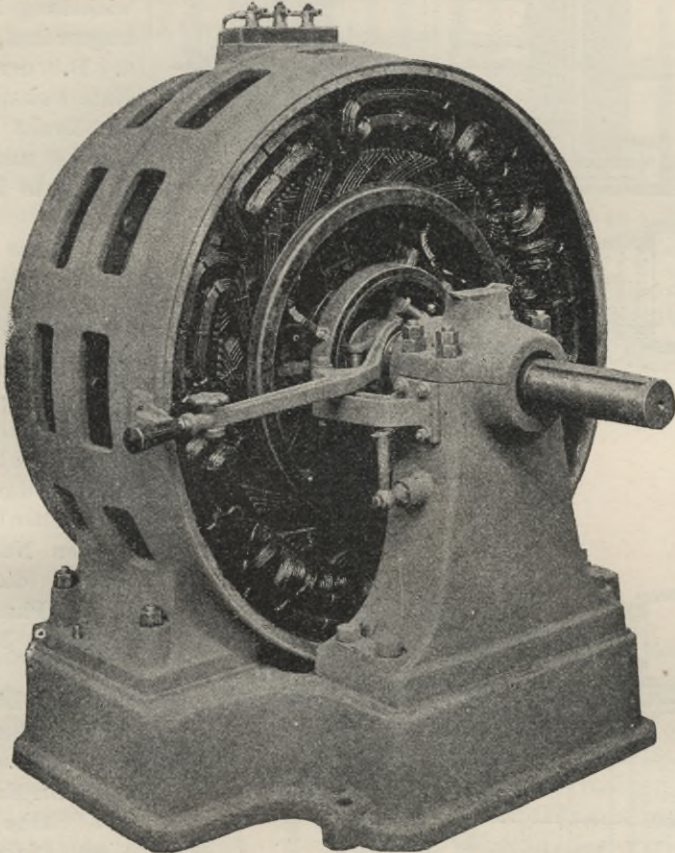


Fig. 320. Hochspannungs-Drehstrommotor der Maschinenfabrik Oerlikon.

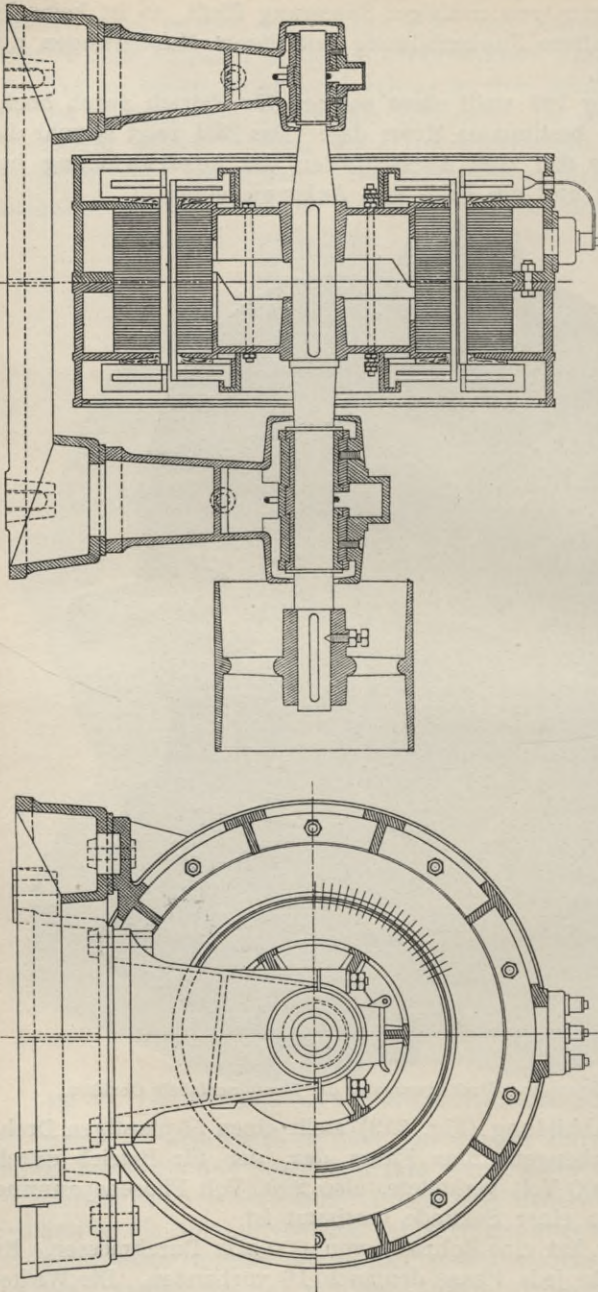
Die nächste Abbildung (Fig. 319) stellt einen 55 pferdigen Drehstrommotor der obengenannten Firma dar, der für Betrieb durch Drehstrom von 5000 Volt verkettete, also 2900 Volt Phasenspannung bei 50 Perioden in einer Sekunde bestimmt ist.

Der Ständer hat eine Bohrung von 600 *mm* Durchmesser. Es sind 48 Nuten, für jede Phase demnach 16 vorhanden. Die Wicke-

Fig. 321a.

Drehstrommotor ohne Schleifringe der Maschinenfabrik Oerlikon.

Fig. 321 b.



lung ist eine 8 polige. In jeder Nute liegen 75 Drähte von 1,8 mm Dicke (2,35 mm besp.).

Die Feldwicklung ist so angeordnet, daß z. B. der aus Nute 1 austretende Draht nach Nute 8 und der aus Nute 2 austretende Draht nach Nute 7 geführt und diese beiden zu einer Phase gehörenden Spulen hintereinander geschaltet sind. In den Nuten 3 und 4 liegen dann die zur zweiten Phase, in den Nuten 5 und 6 die zur dritten Phase gehörenden Spulen u. s. f.

Der Läufer hat einen äußeren Durchmesser von 598 mm. Er trägt 168 Stäbe von 6 mm Dicke (6,6 mm besp.), die in drei Phasen gewickelt sind.

Der Anker macht bei Vollbelastung unter den angegebenen Um-

ständen bei 50 Perioden in der Sekunde 720 Umläufe in einer Minute.

Die Einzelheiten der Konstruktion eines Drehstrommotors von 36 PS ohne Schleifringe der Maschinenfabrik Oerlikon, dessen äußere Ansicht Fig. 320 darstellt, zeigen die beiden Durchschnitte Fig. 321a und b.

Dieser Motor ist für 190 Volt verkettete Spannung und 50 Perioden bestimmt.

Der Ständer enthält 94 Nuten und in jeder Nute liegen zwei Stäbe mit 3×14 *qmm* Querschnitt. Zur Verbindung der einzelnen Stäbe dienen Gabeln, die einen Querschnitt von 2×18 *qmm* besitzen. Die Bohrung beträgt 510 *mm*.

Im Läufer befinden sich 150 Stäbe, die in fünf Phasen vereinigt sind. Jeder solcher Stab hat einen Querschnitt von 4×10 *qmm*; die Verbindungsstücke zeigen Querschnitte von $2,5 \times 14$ *qmm*.

3. Drehstrommotoren von Siemens & Halske.

Neuerdings bedienen sich Siemens & Halske zur Herabsetzung der Tourenzahl auf nahezu die Hälfte des Kunstgriffes, daß sie eine

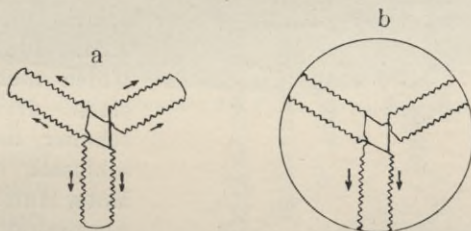


Fig. 322 a.

Fig. 322 b.

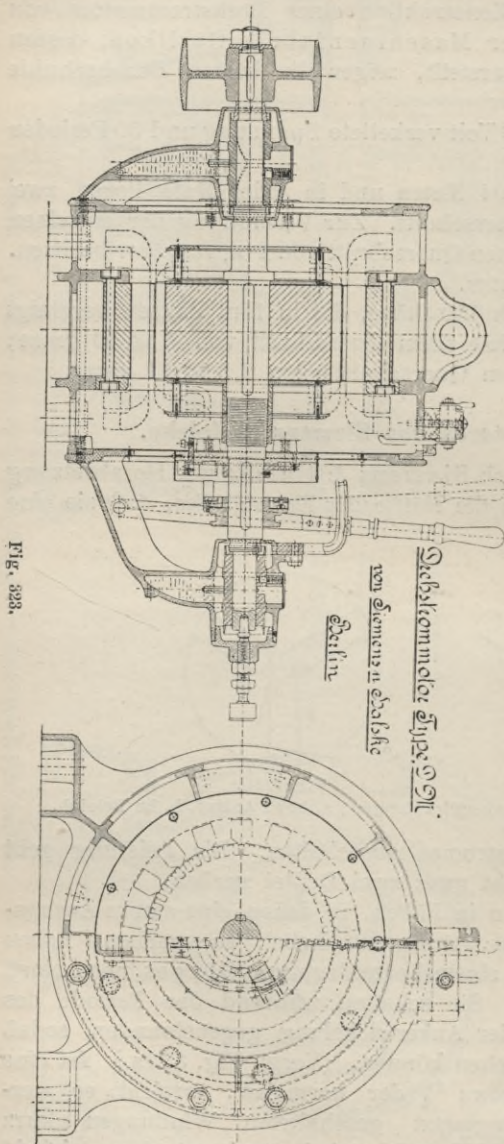
Gegenschaltung getrennter Ankerwickelungen; a. beim Anlauf, b. im Betrieb.

der drei Phasen des Drehstromes ausschalten. Die Leistung geht allerdings dadurch auf nicht ganz zwei Drittel zurück.

Um Anlaßvorrichtungen in Fällen, in denen eine starke Anzugskraft nicht erforderlich ist, ganz entbehrlich zu machen, haben Siemens & Halske nach einem Vorschlage von Görges noch einen anderen Weg beschritten. Sie schalten während der Periode des Anlaufens einzelne Teile der Ankerwicklung gegeneinander, sodaß nur schwache Ströme entstehen können. (Vergl. Fig. 322 a.) Ist eine gewisse Geschwindigkeit, etwa $\frac{3}{4}$ der normalen, erreicht, so werden die vorher entgegengesetzt geschalteten Windungen kurz geschlossen (vergl. Fig. 322 b). Der Anker nimmt dann alsbald seine vorgeschriebene Umlaufzahl an und übt sein volles Drehmoment aus.

In Fig. 323 ist ein Drehstrommotor mit solcher Gegenschaltung abgebildet. Die Umschaltung erfolgt in der einfachsten Weise dadurch,

daß der in der Figur sichtbare Hebel umgelegt wird. Man verschiebt dadurch eine Hülse, die auf der Welle sitzt und von dieser durch Feder und Nut gezwungen wird, an der Rotation teilzunehmen. Durch die Verschiebung werden drei Kontakte unter sich kurz geschlossen, die mit der Ankerwicklung in fester Verbindung stehen. Solange der Motor läuft, bleiben die drei Kontakte fest geschlossen, sodaß Reibungsarbeit und Verschleiß nicht vorhanden sind. Die drei Kontakte bilden nichts weiter als einen dreipoligen Ausschalter, der so lange geschlossen bleibt, wie der Motor läuft. Durch diese Anordnung, die einen Anlasser überflüssig macht, wird nahezu die Einfachheit des Motors mit Kurzschlußanker erreicht, ohne daß man dabei dessen Nachteile mit in Kauf nehmen müßte.



4. Drehstrommotoren von Brown, Boveri & Cie.

Die Firma Brown, Boveri & Cie. in Baden (Schweiz), die sich ebenfalls

mit großem Erfolge an der Ausbildung des Wechsel- und Mehrphasenstromsystems beteiligt hat, bedient sich zum Anlassen

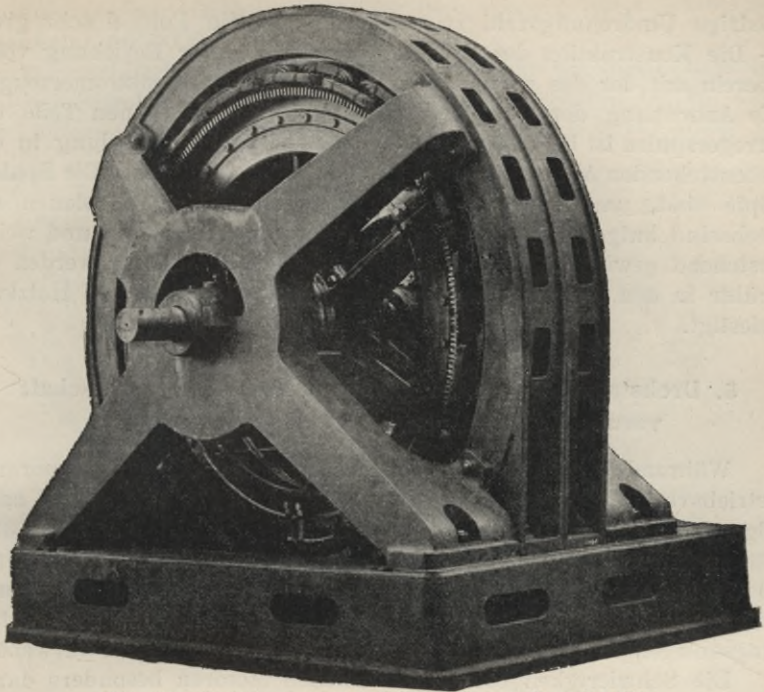


Fig. 324. Drehstrommotor der Firma Brown, Boveri & Cie.

eines Anlaßtransformators mit veränderlichem Übersetzungsverhältnis, der wieder ausgeschaltet wird, wenn der Anker annähernd die normale Umlaufzahl erreicht hat.

Die Fig. 324 stellt einen großen Drehstrommotor dieser Firma für 300 PS und hohe Spannung (3000 Volt) mit Phasenanker dar. Um eine

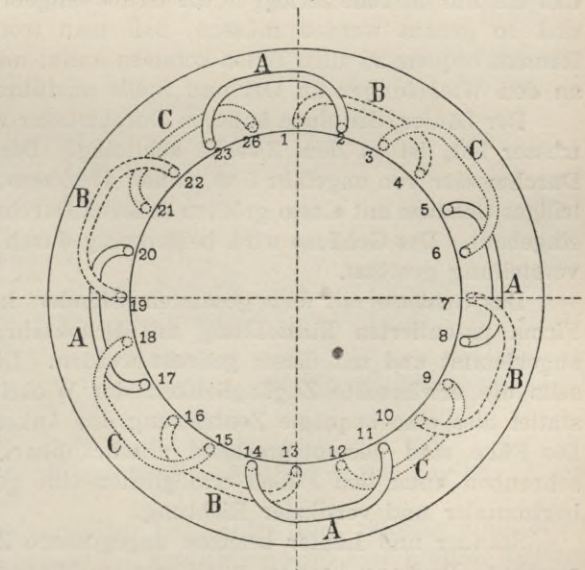


Fig. 325. Feldwicklung für einen vierpoligen Drehstrommotor.

niedrige Umdrehungszahl zu erreichen, ist die Polzahl sehr groß. — Die Konstruktion des Ständers stimmt in jeder Beziehung völlig überein mit der des ruhenden Ankers der Mehrphasenstromerzeuger. Die Anordnung der außerhalb des Feldeisens gelegenen Teile der Erregerspulen ist beispielsweise für eine vierpolige Wickelung in der nebenstehenden Abbildung (Fig. 325) deutlich zu sehen. Die Spulenköpfe sind, um Berührungen zu vermeiden, über Schablonen abwechselnd aufgebogen und näher anliegend, oder gerade und weiter abstehend gewickelt. Nach Fertigstellung der Wickelung werden die Drähte in den Hohlräumen des Eisenkörpers durch kleine Holzkeile befestigt.

5. Drehstrommotoren der Elektrizitäts-Aktien-Gesellschaft vorm. W. Lahmeyer & Co. in Frankfurt a. M.

Während wir bisher nur kleinere Drehstrommotoren für normale Betriebsverhältnisse ($\sim = 50$) besprochen haben, teilen wir im nachfolgenden die Verhältnisse eines größeren für 650 PS (Fig. 326) bestimmten Motors für 25 Perioden in der Sekunde mit, der nur 60 Umdrehungen in der Minute macht, also sich durch langsamen Gang auszeichnet. Derartige Motoren werden vielfach für Wasserhaltungsanlagen in den Gruben in Verbindung mit Pumpen verwendet.

Die Schwierigkeit besteht bei solchen Motoren besonders darin, daß sie nur in Teile zerlegt in die Grube eingebracht werden können und so gebaut werden müssen, daß man trotz des beschränkten Raumes bequem zu allen Teilen kommen kann, um kleine Reparaturen an den Wickelungen an Ort und Stelle ausführen zu können.

Der Läufer, der einen äußeren Durchmesser von 4693 mm Durchmesser hat, ist zu dem Zwecke achteilig. Der Ständer hat einen Durchmesser von ungefähr 5 m, innen 4700 mm, und ist in ein vierteiliges Gehäuse mit einem größten äußeren Durchmesser von 5800 mm eingebaut. Das Gehäuse wird beiderseitig durch eine achteilige Armversteifung gestützt.

Das Gehäuse mit dem gesamten Ständer kann nach einer der Firma patentierten Einrichtung mit Druckschrauben an die Welle angeklemt und mit dieser gedreht werden. Dies ermöglicht einerseits die erwünschte Zugänglichkeit der Wickelung, andererseits gestattet dies eine bequeme Zentrierung des Ankers bei der Montage. Die Füße sind dementsprechend abschraubbar. Keile und Druckschrauben unter den Füßen ermöglichen eine genaue Einstellung in horizontaler und vertikaler Richtung.

Ständer und Läufer besitzen angegossene Zahnkränze, um die erwähnte Drehung bequem ausführen zu können.

Das gesamte Gehäuse samt Versteifungsring wiegt 33600 *kg*,
der Läufer 28000 *kg*.

Die verkettete Spannung beträgt 2000 Volt bei Sternschaltung.

Der Ständer hat 48 Pole, die Nutenzahl desselben beträgt 432.

Der Läufer ist ein Phasenanker, seine Wicklung ist in 528 völlig ge-

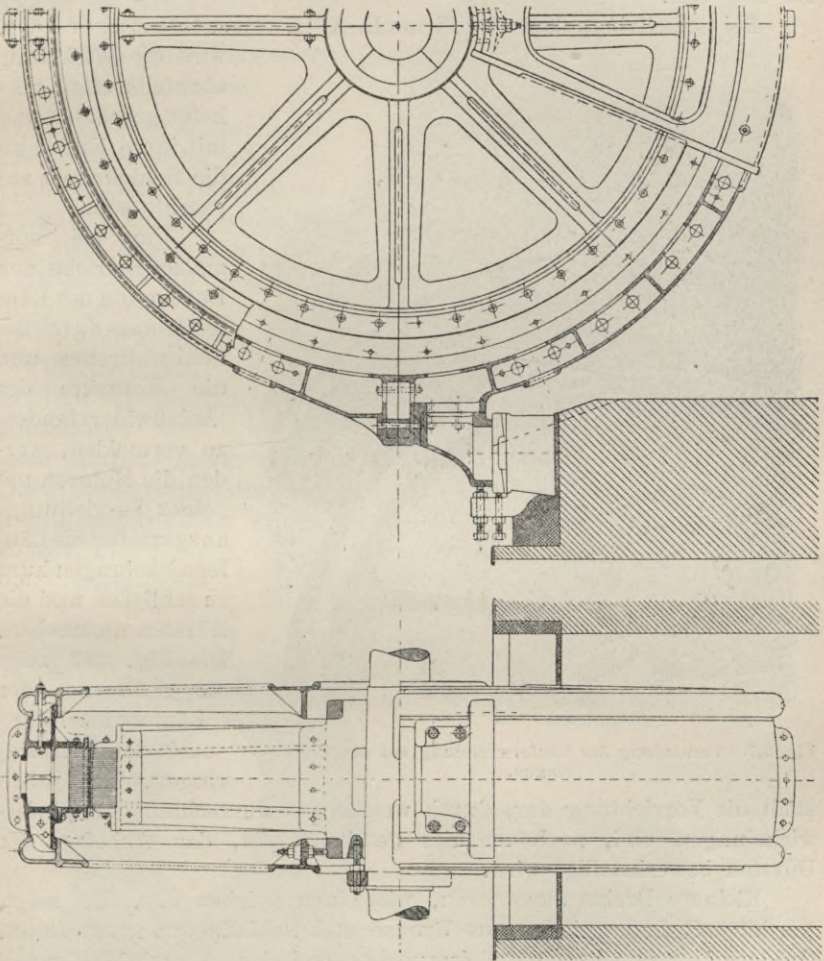


Fig. 326. 650 P.S.-Drehstrommotor (60 Minutenumdrehungen) der E.-A. G., vormals Lahmeyer-Frankfurt a. M.

schlossenen Nuten untergebracht. Die Breite der Läufer beträgt
450 *mm*.

Durch Ventilationsschlitze im Läufer und Ständer und durch
den freien Raum zwischen den Armstützen wird eine kräftige Lüftung

herbeigeführt, sodaß bei Dauerbetrieb mit voller Belastung sich der Motor nur 45° C. über die Außentemperatur erwärmt.

Die Wicklungen liegen in geschlossenen Mikanitröhren.

Die Wicklung des Läufers ist so bemessen, daß beim Anlassen keine höhere Spannung zwischen zwei Leitungen desselben eintritt als 250 Volt.

Bei Schleifringankern der Firma E.-A.-G. vorm. Lahmeyer & Co.

wird die Wicklung ebenfalls offen verkettet geschaltet und mit ihren Enden an die Schleifringe angeschlossen.

Um bei normalem Betriebe den Durchgang des Läuferstromes durch die Schleifbürsten und die Kontakte des Anlaßwiderstandes zu vermeiden, werden die Motoren mit einer Vorrichtung ausgestattet die Läuferwicklungen kurz zu schließen und die Bürsten abzuheben. Die Fig. 327 zeigt die Führung der

Läuferwicklung nach den Schleifringen. Fig. 328

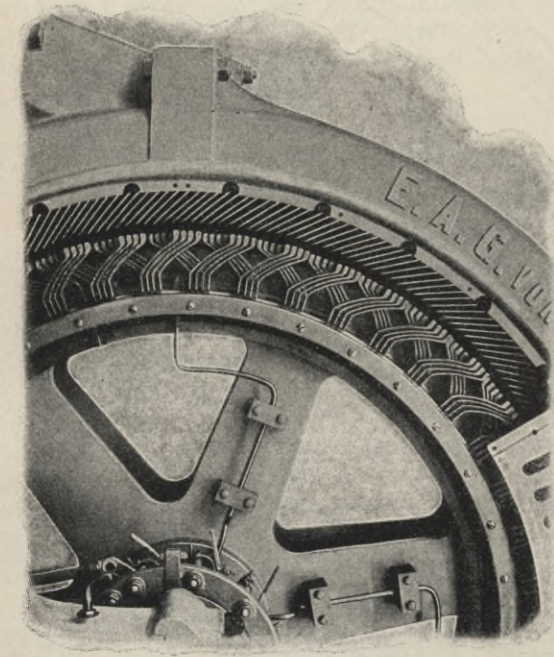


Fig. 327. Verbindung der Läuferwicklung mit den Schleifringen.

stellt die Vorrichtung dar, durch welche der Kurzschluß der Läuferwicklungen und, nachdem dies geschehen ist, das Abheben der Bürsten bewerkstelligt wird.

Kleinere Drehstrommotoren, wie einen solchen Fig. 329 zeigt, werden mit Lagerschalen aus Bronze und Schildlagern ausgestattet. Größere Apparate haben gußeiserne Lagerschalen, die mit Weißmetall ausgefüllt sind. Große Auflageflächen sichern ruhigen Gang der Achswellen und geringe Abnutzung der Lagerschalen.

Um die Bedienung möglichst zu beschränken, werden alle Drehstrommotoren mit Ringschmierung versehen. (Vergl. Gleichstromtechnik Kap. XXV, 3, S. 495.)

Für eine Änderung der Geschwindigkeit in zwei Stufen werden gelegentlich auch von dieser Firma Motoren mit Polumschaltung gebaut, sodaß die Polzahl geändert werden kann. (Vergl. S. 425.)

6. Anlaß- und Umsteuer- einrichtungen.

Kleine Drehstrommotoren werden meist mit Kurzschlußankern, Käfigankern gebaut. Der rotierende Anker steht daher in keinerlei Verbindung mit dem Betriebsstrome.

Kleine Motoren, bis etwa 7 Pferdestärken, die an größere Verteilungsnetze angeschlossen sind, werden auch ohne weiteres durch einen Ausschalter mit drei Verbindungsstücken (vergl. S. 409, Fig. 316 a u. b) ein- und ausgeschaltet.

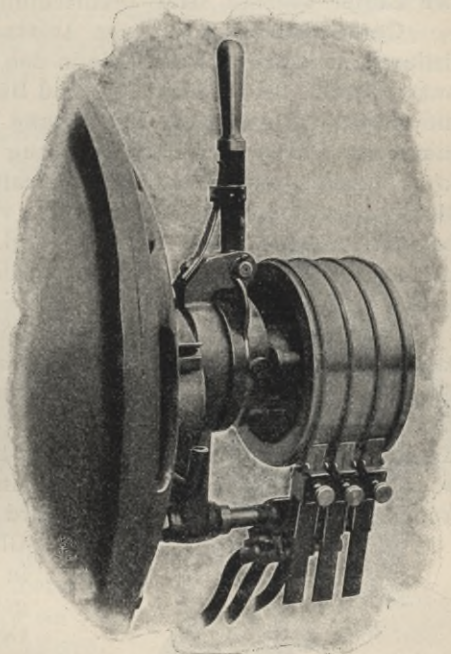


Fig. 328 Kurzschluß- und Bürstenabhebevorrichtung.

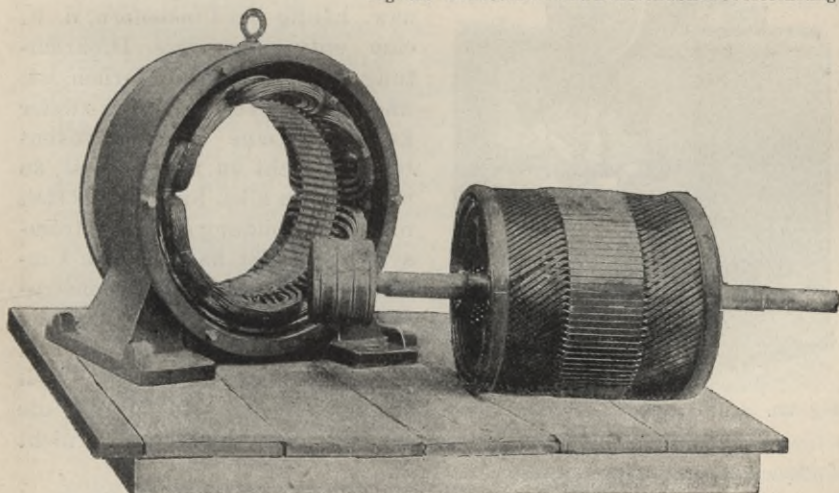


Fig. 329. Kleiner Drehstrommotor mit Kurzschlußanker der E.-A.-G. vorm. W. Lahmeyer & Co.

Durch Drehen des Ausschalters um 180° werden zwei Anschlußleitungen vertauscht, und dadurch wird der Motor umgesteuert, d. h. der Läufer wechselt seine Drehrichtung.

Große Stromstärken beim Anlassen des Motors vermeidet man dadurch, daß man Widerstände in den Ankerstromkreis eines Phasenankers durch drei Schleifringe und Bürsten einschaltet. (Man vergl. die auf S. 411 abgebildete Einrichtung.) Dann läuft der Motor nahezu mit voller Kraft an. Bei Einschaltung von Widerstand in den Stromkreis des Ständers nimmt die Zugkraft erheblich ab, sodaß man die Motoren dann mit einer Leerscheibe versehen muß und sie nur unbelastet anlaufen lassen kann. (Vergl. Fig. 301, S. 383.) Auch ist der Gebrauch von veränderlichen Widerständen im primären Stromkreise bei hohen Spannungen nicht unbedenklich.

Durch Einschalten von Widerständen in den Ankerstromkreis kann man auch die Schlüpfung verändern, also in gewissen, allerdings nur sehr engen Grenzen die Umlaufszahl des Ankers nach Bedarf regeln. Sowohl die Maschinenfabrik Oerlikon als Siemens & Halske haben gelegentlich diesen Kunstgriff angewendet. Da aber durch eine derartige Einschaltung von Widerständen der Wirkungsgrad sehr herabgedrückt wird (vergl. Kap. 22, 3., S. 389, Gl. 24), so empfiehlt es sich, nur in Notfällen und nur vorübergehend von diesem Hilfsmittel Gebrauch zu machen.

Da bei Aufzügen, Kranen usw. häufig ein Umsteuern, d. h. eine entgegengesetzte Drehrichtung des Ankers erforderlich ist, und bei der Vertauschung zweier Leitungen eine starke Funkenbildung nicht zu umgehen ist, so werden von allen Firmen, die sich mit der Ausbildung des Drehstromsystems befaßt haben, auch Umsteuerungsvorrichtungen konstruiert. Man verwendet für diesen Zweck bei allen größeren Motoren Kohlenkontakte, die den Vorteil darbieten, daß sie durch die entstehenden Lichtbogen nicht

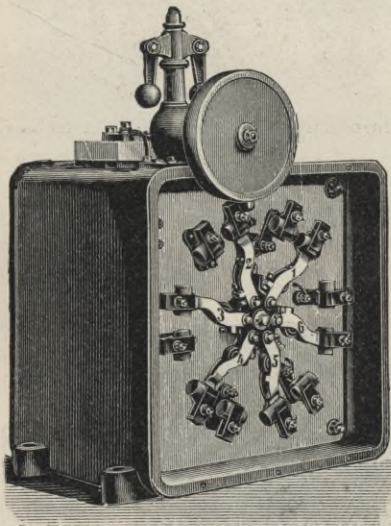


Fig. 330. Anlaßvorrichtung für Drehstrommotoren von Siemens & Halske.

leiden und nicht zusammen schweißen.

Die Fig. 330 stellt einen Anlasser mit Kohlenkontakten und Fig. 331 einen Umsteuerapparat vor, wie solche von Siemens &

Halske verwendet werden. Der Anlasser besitzt eine kleine Riemenscheibe, die durch einen leichten Riemen mit dem Motor verbunden wird. Diese Riemenscheibe setzt einen Zentrifugalregulator in Tätigkeit, der mit zunehmender Drehgeschwindigkeit mehr und mehr Widerstand aus dem Läuferstromkreis ausschaltet und schließlich, nachdem die normale Tourenzahl erreicht ist, die Ankerwicklung selbsttätig kurzschließt.

Der Vorgang des Umstuerns besteht dabei aus einem Abstellen der Stromzufuhr, Stillhalten durch Bremsung und Wiederanlassen in entgegengesetzter Richtung mit Hilfe des Anlaßwiderstandes.

Die Bremsung geschieht im allgemeinen auf mechanischem Wege oder durch besonders beigefügte Wirbelstrombremsen, also durch außerhalb des Drehstrommotors liegende Vorrichtungen.

Die Bremsung durch Gegenstrom, also durch Umschaltung zweier Zuführungsleitungen ist nur bei sehr kleinen Motoren angängig. Der Primärstrom beim Umstuern ist wenig größer als der Anlaßstrom. Im Augenblicke des Umstuerns beträgt die Schlüpfung 200%, das starke Anwachsen des Streufeldes in solchem Momente aber setzt einem übermäßigen Anwachsen des Gegenstromes ein natürliches Hindernis selbsttätig entgegen.

Die Elektrizitäts-Aktien-Gesellschaft vorm. W. Lahmeyer & Co., Frankfurt a. M. baut einen selbsttätigen Anlasser, bei welchem für das Einschalten eine langsame Bewegung des Anlasserhebels, für das Ausschalten eine schnelle Bewegung erzielt wird.

Der Motor M Fig. 332 erteilt, sobald er sich in Bewegung setzt, durch eine Kurbel k dem Hebel h eine hin- und hergehende Bewegung. Der Hebel h trägt zwei Sperrzähne, die durch Anbringung einer Feder das Bestreben haben, in die Zähne eines Zahnsegmentes S einzugreifen. Die Achse von S ist mit dem eigentlichen Anlaßschalter gekuppelt. Der Eingriff der beiden Sperrzähne wird durch eine Stange a geregelt, welche durch den Magneten e beeinflußt wird. Ruht der Motor, so ist der Magnet e stromlos, dann liegt der untere Sperrzahn z_1 im Eingriff, während der obere Sperrzahn z durch den Anschlagstift s abgehoben ist.

Wird die Leitung zum Motor geschlossen, so erhält sowohl der Motor als auch der Magnet Strom. Die vorgeschalteten Widerstände A sind so bemessen, daß sich der Motor langsam in Bewegung setzt

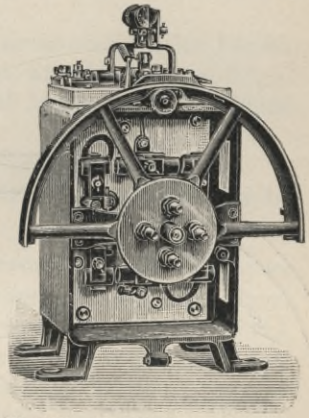


Fig. 331. Umsteuerapparat für Drehstrommotoren von Siemens & Halske.

und dabei den Hebel *h* hin- und herbewegt. Gleichzeitig wird aber auch die Arretierstange *a* nach unten bewegt und der untere Sperrzahn z_1 abgehoben, während der obere Sperrzahn *z* nunmehr eingreifen kann. Bei jedem Hin- und Hergang des Hebels wird daher das Zahnsegment *S* und somit der Anlasser, der dem in Fig. 318 dargestellten ähnlich ist, um eine Stufe vorwärts geschoben und zwar soweit, bis die Sperrzähne zu Ende sind. Dann sind sämtliche Anlaßwiderstände, die vor der Phasenwicklung des Ankers liegen, ausgeschaltet. Der Hebel arbeitet dann

zwar noch weiter, faßt jedoch keine Zähne mehr.

Soll der Motor abgestellt werden, so braucht nur der Motorstromkreis stromlos gemacht zu werden. Der Anker des Magneten fällt dann ab, die Arretierstange *a* löst den oberen Sperrzahn *z* aus und läßt den unteren z_1 eingreifen. Die lebendige Kraft des Motors ist nach dem Ausschalten noch groß genug, um durch zweimaligen Hin- und Hergang den Anlaßhebel in seine Nullage zurück zu bringen. Da der Einschaltzahn am Scheitel des Winkelhebels liegt, der Ausschaltzahn aber sich in größerer Entfernung davon befindet, und weil ferner der Durchmesser des Anlaßsegmentes groß, der des Ausschaltsegmentes aber klein ist, erfolgt die Ausschaltung der Widerstände aus dem Läuferstrom langsam, der Übergang zur Ruhstellung jedoch plötzlich.

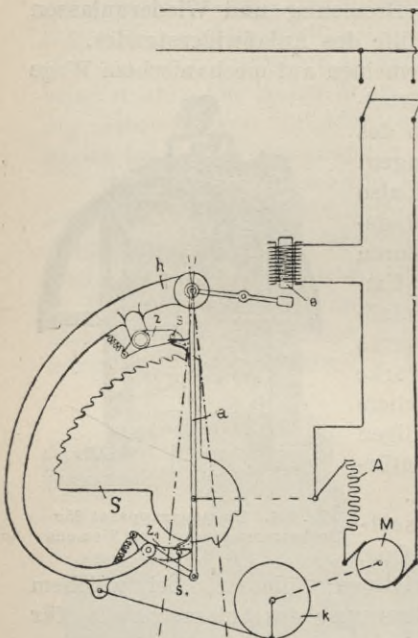


Fig. 332.

Selbsttätiger Anlasser für Drehstrommotoren der E.-A.-G. vorm. W. Lahmeyer.

7. Regelung der Umlaufzahl der Drehstrommotoren.

Während die außerordentliche Einfachheit und Betriebssicherheit der asynchronen Drehstrommotoren Veranlassung gewesen sind, daß diese Maschinen nach und nach die erste Stelle unter den Antriebsmaschinen der Technik sich erobert haben, ist es stets als ein wesentlicher Übelstand empfunden worden, daß die Umlaufzahl dieser Motoren wenig oder wenigstens nur in den engen Grenzen der Schlüpfung veränderlich ist.

Abgesehen von der Schlüpfung ist die Umlaufszahl:

$$u = \frac{120 \cdot \sim}{p};$$

sie ist also durch Periodenzahl \sim und die Polzahl $2p$ nahezu fest gebunden.

Für eine große Zahl von Fällen, zumal aber für den Betrieb von Fahrzeugen aller Art, Hebemaschinen etc., ist es jedoch im hohen Grade wünschenswert Motoren zu haben, die eine bestimmte Arbeit mit verschiedenen Geschwindigkeiten zu leisten imstande sind. Die Wege, die eingeschlagen worden sind, um beim Drehstrommotor eine Veränderlichkeit der Umlaufszahl zu erreichen, lassen sich in folgende Hauptgruppen einteilen: ¹⁾

- a) Regelung durch Einführung von Widerständen in den Läufer.
- b) Regelung mittels Polumschaltung im Ständer.
- c) Regelung durch Umschaltung koaxial angeordneter, verschiedentlich gewickelter Ständer.
- d) Anwendung der sogenannten Kaskadenschaltung.
- e) Einführung von Wechselstrom in den Läuferstromkreis bei den sogenannten Kollektormotoren.

a) Regelung der Umlaufszahl durch Änderung des Widerstandes im Läuferstromkreise.

Ursprünglich hatte die Einschaltung äußerer Widerstände durch Schleifringe in den Stromkreis des Läufers (vergl. Kap. 23, 2, S. 411, Fig. 318) lediglich den Zweck das Angehen der Motoren mit einer Anlaufstromstärke zu erreichen, die nicht sehr viel größer war als die Stromstärke bei normalem Betriebe. Man hat jedoch dasselbe Mittel auch mehrfach verwendet, um die Umlaufszahl des Läufers zu vermindern. Es sinkt jedoch der Nutzeffekt und die Leistung nahezu proportional mit der Geschwindigkeit, ²⁾ und bei dauernder Anwendung eines Motors mit erheblicher Schlüpfung wird die Wärmeentwicklung im Läufer sehr groß. Die Anwendbarkeit dieses Verfahrens ist daher ziemlich eng begrenzt.

b) Regelung der Umlaufszahl durch Polumschaltung.

Diesen Ausweg hat bei den Drehstrommotoren mit Grammeringwicklung des Ständers (vergl. Kap. 23, 1, S. 409, Fig. 315) die Maschinenfabrik Oerlikon schon im Jahre 1893 mit bestem Erfolge zur Anwendung gebracht. Mittels eines besonderen Schalters wurden z. B. die auf dem Umfange des Ständers verteilten Spulengruppen (vergl. Fig. 333) entweder alle hintereinander oder die Hälfte parallel geschaltet; auf diese Weise erhielt man, wenn ursprünglich $6p$ Spulengruppen vorhanden waren, einen Motor, der je nachdem mit $2p$ Polen

¹⁾ Man vergl. auch S. 415, 2, 18.

²⁾ Vergl. die Versuche von W. Burkhard ETZ 1903, S. 695.

oder mit 4 p Polen tätig sein konnte; der Läufer machte im letzteren Falle sehr nahe halb soviel Touren als im ersten Falle.

Die Schaltung wird für eine zwei- und vierpolige Anordnung und die Einrichtung des zugehörigen Schalters schematisch durch Fig. 333 und Fig. 334 dargestellt.

Der Magnetisierungsstrom bleibt bei zwei- und vierpoliger Schaltung nahezu derselbe; der Streukoeffizient ist jedoch bei der vierpoligen Wickelung nahezu doppelt so groß als bei der zweipoligen; die Leistungsfähigkeit des zweipoligen Motors war beinahe das Doppelte, als wenn derselbe Motor als vierpoliger benutzt wurde.

Das Anzugsmoment für die geringere Umlaufzahl war gering. Es konnten daher solche Verwendung finden, wo die Eigenart der Betriebsverhältnisse diesen Eigenschaften des Motors entsprach.

Als man weiterhin versuchte dasselbe Verfahren auch bei Dreh-

kleineren Umlaufzahl war Motoren vorteilhaft nur da

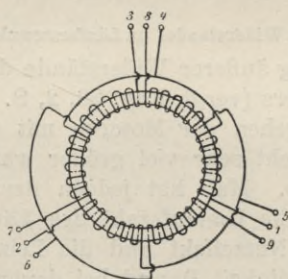


Fig. 333. Ständerwicklung eines zwei- und vierpoligen Motors mit Polumschaltung.

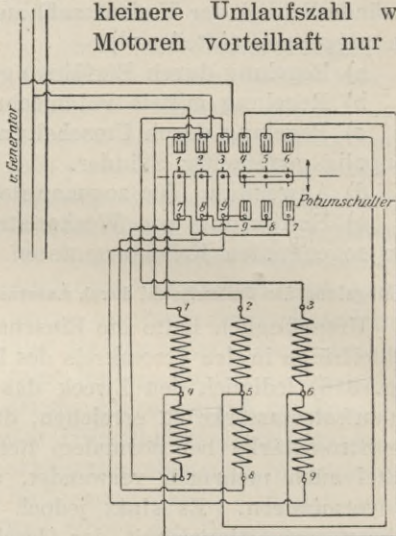


Fig. 334. Verbindung der Wickelung mit dem Umschalter.

strommotoren anzuwenden, deren Ständer mit Trommelwicklung versehen waren, stellte sich heraus, daß bei dieser Wickelung für die kleinere Polzahl die Streuung sehr groß wurde. Bei der niedrigen Polzahl war daher die Anzugskraft beim Anlauf eines Kurzschlußankers sehr gering.

Neuerdings (1902)¹⁾ hat die Maschinenfabrik Oerlikon jedoch eine besondere Art der Trommelwicklung für Ständer, die mit verschiedenen Polzahlen betrieben werden können, aufgefunden, bei deren Anwendung die Motoren für die verschiedenen Polzahlen gleich gute Betriebsverhältnisse zeigen. Die Wickelung wird in $6 \times p$ Spulengruppen eingeteilt, wobei p die kleinste Zahl der zu bildenden Pol-

¹⁾ Behn-Eschenburg, Schweizerische Bauzeitung Bd. 40, No. 16; auch ETZ 1902, S. 1056.

paare bedeutet. Diese Spulengruppen werden durch Umschalter für p und $2p$ Polpaare umgeschaltet. Für die Polpaarzahl p werden je zwei Spulenreihen für jede Phase parallel miteinander, für die Polpaarzahl $2p$ in Serie geschaltet. Die Schaltung führt zu Motoren mit konstantem Drehmoment. Die Zahl der Motorklemmen beträgt mindestens 6. Es können nämlich in dem oben (Fig. 333) dargestellten Schema durch einfache Vertauschung der Wicklungsenden, welche zu dem neutralen Punkt vereinigt werden, mit den Wicklungsenden, an welche die Stromzuleitungen angeschlossen sind, 3 Ableitungsklemmen entbehrlich gemacht werden. In dem Schema der Fig. 333 werden die Ableitungen 7, 8 und 9 miteinander dauernd kurzgeschlossen; für die zweipolige Schaltung treten dann die drei Stromphasen durch die Ableitungen 4, 5 und 6 ein und es werden außer 7, 8 und 9 die Enden 1, 2, 3 miteinander kurzgeschlossen. Für die vierpolige Schaltung werden dagegen die drei Stromphasen bei 1, 2 und 3 eingeführt, der Vereinigungspunkt der Enden 7, 8 und 9 wird beibehalten.

Eine noch wesentlich einfachere Schaltung benutzt Oerlikon für Motoren, deren Zugkraft bei der höheren Geschwindigkeit kleiner sein kann als bei der kleineren Geschwindigkeit, indem statt der bisher bekannten Sternschaltung der 6 Spulengruppen die Dreieckschaltung verwendet wird. Sämtliche 6 Spulen bleiben sowohl für 2 als auch für 4 Pole, resp. für irgend ein Vielfaches dieser beiden Polzahlen dauernd miteinander in Serie geschaltet, und es wird nur die Stromzuführung von den Wicklungsenden 1, 2, 3 für die größeren Polzahlen nach den Wicklungsenden 4, 5 und 6 für die kleineren Polzahlen versetzt. Bei dieser Anordnung ist für die kleinere Polzahl der Leerlaufstrom bedeutend kleiner als für die größere Polzahl.

Unter Benutzung dieser von der Maschinenfabrik Oerlikon eingeführten neuen Trommelwicklung können die magnetischen und elektrischen Verhältnisse des Motors zu Gunsten oder Ungunsten der einen oder anderen Polzahl verschoben werden, indem der Wicklungsschritt der einzelnen Wicklungselemente mehr der Polteilung der einen oder mehr der anderen Polzahl angepaßt wird.

Unter Benutzung des für Trommelwicklung früher eingeführten Systems von zwei getrennten Wicklungen läßt sich nun weiter die Zahl der Geschwindigkeitsstufen leicht auf 4 erhöhen, ohne daß die Zahl der Ableitungen zu groß wird. Die Zahl der Ableitungen für Motoren mit vier Geschwindigkeitsstufen wird 2×6 , also nicht größer als für vier einzelne normale Motoren. Der Motor erhält zwei getrennte Wicklungen, von denen jede für zwei Polzahlen, die im Verhältnis 1 : 2 stehen, umschaltbar ist. Der Umschalter selbst ist eine Kombination von zwei gewöhnlichen dreipoligen Umschaltern.

Von ganz besonderem Vorteil wird die Möglichkeit der Umschaltung, wenn die Reihenfolge der Geschwindigkeiten von der kleinsten zu der größten Geschwindigkeit ohne Drehrichtungswechsel verläuft, wobei beim Abstellen des Motors der Übergang von jeder höheren zu der nächsten kleineren Geschwindigkeit fast augenblicklich vor sich geht, indem der von der kleineren auf die größere Polzahl umgeschaltete Motor so lange als Generator Strom in das Leitungsnetz zurückschickt, bis die der höheren Polzahl entsprechende niedrigere Geschwindigkeit erreicht ist.

Im allgemeinen ist für die doppelte Polzahl der Streuungskoeffizient wenigstens zweimal größer als für die halb so große Polzahl; infolgedessen ist der Anlaufstrom des Motors mit Kurzschlußanker mit der doppelten Polzahl, auf gleichen Magnetisierungsstrom reduziert, halb so groß als bei größerer Geschwindigkeit. Es kommt daher der Umstand vorteilhaft zur Geltung, daß der Motor beim Anlaufen mit der kleinen Geschwindigkeit einen niedrigeren Anlaufstrom aufweist als bei größerer Geschwindigkeit. Es kann daher bei Motoren mit Kurzschlußankern die Polumschaltung an Stelle besonderer Anlaßvorrichtungen zur Verminderung des Anlaufstromes ohne weiteres benutzt werden.

Bei Motoren mit zwei Geschwindigkeitsstufen, die im Verhältnis von 1 zu 2 stehen, wird Leistungsfähigkeit und Wirkungsgrad bei wenig höherem Gewicht, Volumen und Preis fast genau derselbe sein wie bei gewöhnlichen einstufigen Drehstrommotoren, nur der Preis des Umschalters kommt neu hinzu.

Bei Motoren mit vier Geschwindigkeitsstufen werden Gewicht, Volumen und Preis etwas erhöht, dafür aber können besondere Anlaßvorrichtungen außer dem Umschalter in Wegfall kommen.

Ein Stufenmotor für vier Geschwindigkeitsstufen von 220 *kg* Gewicht¹⁾ bei 190 Volt Spannung und 50 Perioden ergab folgende Versuchsergebnisse:

Polzahl (Sternschaltung)	12	8	6	4
Tourenzahl leer	500	750	1000	1500
Schlüpfung bei Vollast %	10	7	3	4
Leistung normal in PS	3,5	4	7	8
Wirkungsgrad bei $\frac{1}{1}$ Last %	72	73	85	86
» » $\frac{1}{2}$ » »	70	72	82	86
$\cos \varphi$ bei $\frac{1}{1}$ Last	0,7	0,82	0,85	0,92
$\cos \varphi$ » $\frac{1}{2}$ »	0,5	0,65	0,70	0,83
Drehmoment, normal <i>kgm</i>	5,5	4,1	5,2	4
» , maximal »	9,5	6,2	18	12
Anlaufzugkraft <i>kg</i>	5,5	3,5	6	5
Leerlaufstrom i. A	11	9	8,5	6
Anlaufstrom i. A	50	50	130	138
Erwärmung n. 3 Stunden bei Vollast °C	50	50	40	40

¹⁾ Ein normaler einstufiger Drehstrommotor der Maschinenfabrik Oerlikon für 4 Pferdestärken wiegt etwa 110 *kg*.

Der Läufer dieses Motors besaß zwei getrennte Kurzschlußwickelungen aus Draht ohne Isolation.

Man kann diese Lösung des Problems der Tourenregulierung der Drehstrommotoren somit für eine technisch wohl befriedigende ansehen.

c) **Regelung durch Umschaltung coaxialer, verschiedenpolig gewickelter Ständer und mechanisch gekuppelter Läufer.**

Die Firma C. Wüst & Cie. in Seebach-Zürich hat die Lösung der Aufgabe auf einem anderen Wege versucht.¹⁾ Sie bringt die Ständer mehrerer Motore in einem Gehäuse unter und ordnet die verschiedenen zugehörigen Läufer auf einer gemeinsamen, durchgehenden Achse an.

Mit einem solchen Motor können verschiedene Geschwindigkeiten bei beliebigen Leistungen und Anzugskräften und gleich hohem Nutzeffekte erreicht werden, aber freilich wird auch Gewicht und Preis der Summe für die verschiedenen einzelnen Motore nahezu gleich sein.

Wenn es sich darum handelt für kurze Zeit, z. B. bei Bahnbetrieb, für Überwindung kurzer steiler Steigungen viel größere Leistungen als gewöhnlich zu erzielen, können außerdem die verschiedenpolig gewickelten Elemente noch parallel geschaltet werden.

Bei einem Dreistufenmotor, der aus einem vierpoligen, einem sechspoligen und einem achtpoligen je dreipferdigen Motor bestand, erhielt man z. B. bei Leerlauf, wenn einer der drei Motoren allein eingeschaltet wurde, 1500, 1000, 750 Umdrehungen in der Minute. Schaltete man den vier- und sechspoligen Motor parallel, so erhielt man bei Leerlauf 1060 Umdrehungen, und bei einer Leistung von 7 PS 930 Touren.

Wurden der sechs- und der achtpolige Motor parallel geschaltet, so war bei Leerlauf die Umlaufzahl 790 und bei Belastung mit 8,7 PS 690.

Benutzt man den vier- und achtpoligen Motor in Parallelschaltung, so ergaben sich unbelastet 770 Touren und bei einer Leistung von 6,7 PS 670 Umläufe.

Wenn man alle drei Motoren parallel schaltete, ergaben sich bei Leerlauf 820 und bei einer Belastung mit 10,6 PS 690 Touren.

Andere Geschwindigkeiten und Leistungen können noch dadurch erreicht werden, daß man die Motoren gegeneinander, d. h. den einen für Linksgang, den anderen für Rechtsgang schaltet.

¹⁾ W. Burkhard, Regulierung von Drehstrommotoren ETZ 1903, S. 694. Vergl. aber auch ETZ 1903, S. 793.

Bei der Parallelschaltung wird bei anfänglich kleiner Last der Motor mit der kleineren Polzahl mit maximaler Belastung arbeiten und den anderen Motor mit der höheren Polzahl mit sich ziehen, sodaß er übersynchron (mit negativer Schlüpfung) läuft und Energie an das Netz zurück gibt. Bei wachsender Last sinkt die Energierückgabe mehr und mehr, und wenn die Schlüpfung des Motors mit der größeren Polzahl positiv wird, gibt auch er Arbeit ab.

Der Wirkungsgrad ist bei Parallelschaltung wesentlich niedriger, als wenn jeder Motor allein arbeitet; die Erwärmung ist jedoch viel größer, auch viel größer, als wenn ein Motor allein mit erheblicher Überlastung arbeitet. Dieses Grundes wegen kann die Parallelschaltung mehrerer Wicklungen nur kurze Zeit aufrecht erhalten werden.

d) Kaskadenschaltung.

Auf diese etwas verwickeltere Schaltung hat zuerst Danielson¹⁾ hingewiesen.

Von zwei hinsichtlich der Polzahl verschiedenen, in der Leistung aber gleichen Drehstrommotoren, deren Läufer auf einer gemeinsamen Achse sitzen, wird die Phasenwicklung des einen Läufers zu drei Schleifringen geführt, von diesen wird der im Läufer induzierte Dreiphasenstrom durch Zuleitungen in die Ständerwicklung des zweiten Drehstrommotors eingeführt. An das Verteilungsnetz wird nur die Ständerwicklung des ersten Motors angeschlossen.

Wählt man z. B. einen vierpoligen und einen zehnpoligen Motor, so kann man bei 50 Perioden, je nachdem man nun den vierpoligen oder den zehnpoligen Motor an das Netz anschließt, die Umdrehungszahlen 1500 und 600 erhalten. Werden aber die Motoren in der angegebenen Weise in Kaskade geschaltet, so ist das System einem vierzehnpoligen ($2 \times 2 + 2 \times 5$ poligen) Motor gleichwertig und man erhält die Umdrehungszahl 248.

Schaltet man endlich durch Vertauschung zweier Klemmen die Ständerwicklung des sekundär angetriebenen Motors gegen die Läuferwicklung des primär geschalteten, so entspricht das System einem sechspoligen, allgemein $2 p_1 - 2 p_2$ -poligen Motor, und die Umlaufzahl beträgt 1000 in der Minute.

Ist die Zugkraft des vierpoligen Motors allein Z , so ist die des zehnpoligen allein $2,5 Z$, bei Schaltung als vierzehnpoliger Motor erhält man nahezu die Zugkraft $3,3 Z$ und bei Gegenschaltung in der Kaskade ungefähr $1,5 Z$.

Für elektrische Eisenbahnen mit Drehstrombetrieb ist diese Anordnung von Vorteil, denn man kann bei Steigungen, je nach der aufzuwendenden Zugkraft bei nahezu gleichem Stromverbrauch unter

¹⁾ Vergl. die amerikan. Zeitschrift: Street Railway Journal 1902, Heft 6.

Verwendung zweier Motoren mit vier verschiedenen Geschwindigkeiten fahren.

Verwendet man in Kaskadenschaltung zwei völlig gleiche Motoren, so läuft jeder Motor nur mit halber Geschwindigkeit, gibt aber das normale Drehungsmoment, beide zusammen geben also das doppelte Drehungsmoment.

Werden die bei Parallelschaltung in voller Geschwindigkeit laufenden gleichen Motoren plötzlich in Kaskade geschaltet, so wirken sie als übersynchrone Generatoren bremsend und geben Energie an das Verteilungsnetz zurück, bis ihre Geschwindigkeit auf die Hälfte gesunken ist.

Infolge des Auftretens starker wattloser Ströme ist bei Kaskadenschaltung allerdings der Leistungsfaktor um so schlechter, je niedriger die Umlaufzahl wird.

e) Tourenregelung durch Einleitung von Wechselstrom in den Läufer.

Auf diesem Wege ist bei allen Asynchronmotoren sogar eine stetige, nicht bloß wie bisher eine sprungweise Regelung der Umlaufzahl der Läufer möglich. Wir berichten darüber ausführlicher im Kapitel 25, 5, wo von der Regelung der Umdrehungszahlen bei Kollektormotoren gesprochen wird.



24. Kapitel.

Einphasige Wechselstrommotoren.

1. Allgemeines über asynchrone, einphasige Wechselstrommotoren.

Nicht selten hat man den Wunsch auch an Verteilungsnetze, die mit einphasigem Wechselstrom betrieben werden, Motoren mit nur zwei Leitungen anschließen zu können. Dazu dienen die einphasigen Wechselstrommotoren oder Wechselstrommotoren schlechthin genannten Vorrichtungen. Diese Motoren sind in der Hauptsache nach denselben Grundsätzen gebaut wie die Drehstrommotoren; im normalen Betriebe haben diese Apparate jedoch nur eine Wickelung auf dem Ständer und nicht drei wie der Drehstrommotor. Die Ausführung dieser Motoren ist eine Spezialität, mit der sich bis vor kurzem nur einige Firmen mit Erfolg abgaben; die Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft in Berlin und Siemens & Halske bauten sie z. B. früher längere Zeit nicht.¹⁾

Diese Motoren beruhen auf einer eigentümlichen Beobachtung, die Elihu Thomson gelegentlich seiner früher erwähnten Untersuchungen über anziehende und abstoßende Wirkungen von Wechselströmen (vergl. Kap. 9, 4., S. 123) in den Jahren 1886 und 1887 gemacht hat.

Bringt man vor einen Wechselstromelektromagneten, also in ein sich periodisch umkehrendes Magnetfeld einen Kupferring, so sucht sich dieser Ring aus dem Magnetfeld heraus zu bewegen, oder er dreht sich derart, daß seine Ebene der Richtung der Kraftlinien parallel wird.

Nimmt man statt des Kupferringes eine in sich geschlossene, drehbare Spule, die eine merkliche Selbstinduktion hat, so tritt zwischen dem Phasenzustand des Feldes und der in den Windungen dieser Spule induzierten EMK eine Phasenverschiebung ein, die um so mehr von der normalen von 90° abweicht, je größer diese Selbstinduktion ist. Alsdann entwickelt sich, wenn die Spule im Magnetfelde einmal in Umlauf versetzt ist, ein Drehungsmoment an dieser Spule, das die Spule in Umdrehungen zu erhalten strebt. Dieses Drehungsmoment ist am kräftigsten, wenn $\omega \cdot L = w$ ist, wobei $\omega = 2\pi \sim$, L der Selbstinduktionskoeffizient, w der Widerstand

¹⁾ Neuerdings baut die Elektrizitäts-Aktiengesellschaft vormals W. Lahmeyer & Co. in Frankfurt a. M. den sehr vorzüglichen Heylandmotor.

der Spule und \sim die Anzahl der Perioden des Wechselstromes in einer Sekunde ist.

Elihu Thomson hat, auf diese Beobachtung gestützt, selbst einen Motor konstruiert, in dem wir den ersten Repulsionsmotor vor uns haben.¹⁾ Derselbe ähnelte äußerlich sehr einer Gleichstrommaschine mit unterteiltem Eisenkerne der Feldmagneten. Die Bürsten des gewöhnlichen Gleichstromankers wurden unter einem Winkel von 45° gegen die Richtung der Kraftlinien verstellt und durch einen Kurzschlußdraht miteinander verbunden (vergl. Fig. 335). Sendete man nun durch die Windungen der Feldmagnete einen gewöhnlichen Wechselstrom, so lief der Motor mit beträchtlichem Drehungsmoment von selbst an. War der Anker einmal in rasche Umdrehungen gelangt, so konnte man die Bürsten ganz abheben oder durch einen über den Kollektor geschobenen Ring alle Windungen gleichzeitig kurz schließen; der Anker drehte sich fort und war imstande ein erhebliches Drehungsmoment auszuüben, also Arbeit zu leisten.

Die Richtung der Drehung hängt davon ab, nach welcher Seite hin der Anker einen Anstoß erhält. Von einem wirklichen Synchronismus kann im vorliegenden Falle naturgemäß nicht die Rede sein. Die Geschwindigkeit des Ankers ist am größten beim Leerlauf und nimmt mit zunehmender Belastung ab.²⁾

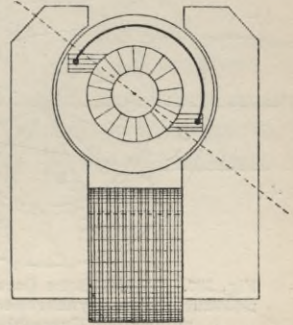


Fig. 335. Asynchroner Wechselstrommotor von Elihu Thomson.

In wesentlich vollkommenerer Weise haben späterhin Brown, von Dobrowolski und die Maschinenfabrik Oerlikon dieses Prinzip angewendet und erhebliche Vorteile besonders dadurch erreicht, daß sie die Windungen, sowohl des rotierenden als des ruhenden Teiles in Löcher einbetteten, die möglichst dicht unter der Oberfläche durch das Eisen gebohrt waren. Dadurch konnte der Luftzwischenraum zwischen Ankereisen und Eisen der Feldmagnete auf ein Minimum herabgedrückt und die magnetische Streuung wesentlich vermindert werden. Außerdem aber können auch für Wechselströme ungeteilte Leiter von erheblichen Querschnitten verwendet werden, wenn dieselben sich ganz im Innern des Eisens befinden,

¹⁾ Man vergl. auch die Konstruktionen von Atkinson (1895—1898), an die neuerdings Osnos, ETZ 1904, S. 1, erinnert hat.

²⁾ Eine Theorie der asynchronen Einphasenmotoren hat zuerst Sahulka aufgestellt; ETZ 1893, S. 391. Späterhin haben Heubach, ETZ 1899, S. 314, und Eichberg, ETZ 1900, S. 384, vervollkommnete Theorien dieser Apparate entwickelt. In sehr leicht verständlicher Weise hat ferner Roeßler in seinem trefflichen Werke: »Elektromotoren für Wechsel- und Drehstrom« eine Darlegung der Betriebsverhältnisse dieser Motoren gegeben.

während sonst stärkere Leitungen, um die Entstehung von Wirbelströmen zu verhüten, aus mehreren voneinander isolierten Drähten hergestellt werden müssen. Fig. 336 erläutert die Einrichtung eines solchen asynchronen Wechselstrommotors.

Der der Induktionswirkung unterworfenen rotierenden Teil W , der Läufer, ist entweder eine Trommel oder ein Grammering, der mit einer geschlossenen Wicklung versehen ist. Der die Induktionswirkung veranlassende ruhende Teil des Apparates, der Ständer (J), besteht aus einem Hohlzylinder, der aus voneinander isolierten Eisenblechen zusammengesetzt ist. Ganz nahe dem inneren Umfange sind

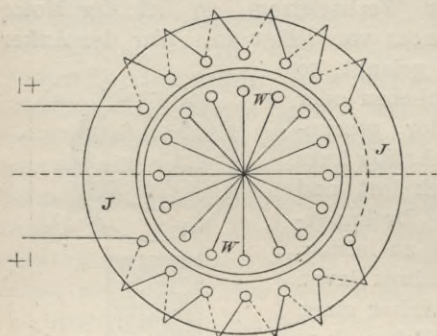


Fig. 336. Schematische Darstellung der Einrichtung eines asynchronen Wechselstrommotors mit Kurzschlußanker.

diese Bleche gelocht und tragen eine Wicklung, die entweder als Ring-, Trommel- oder Wellenwicklung ausgeführt werden kann. Die Schaltung ist derart gewählt, daß eine Anzahl Polpaare entsteht; in der schematischen Zeichnung, Fig. 336, gibt es nur ein Polpaar.

Neuerdings wird die Wicklung des induzierenden Teiles J in ganz ähnlicher Weise durchgeführt, wie dies bei gewöhnlichen Wechselstromerzeugern und Wechselstromsynchronmotoren der Fall ist.

(Vergl. Kap. 11, 17., S. 172 u. s. f.)

Bei Motoren für größere Leistungen wird der Anker mit einer regelmäßigen Wicklung versehen (Brownscher Phasenanker) und um das Angehen zu erleichtern, wird in diese Ankerwicklung noch ein Widerstand eingeschaltet, der durch Schleifringe und Bürsten mit dieser Wicklung verbunden ist, ganz wie wir dies bereits bei den Drehstrommotoren (Kap. 23) kennen gelernt haben. Wenn der Motor die normale Geschwindigkeit erreicht hat, werden die Bürsten kurz geschlossen. Um die Motoren anzulassen, wird oft auf eine der vorher angegebenen Weisen eine Kunstphase hinzugefügt, sodaß der Motor als Zweiphasenmotor anläuft. Sowie die volle Umlaufzahl erreicht ist, wird diese zweite Phase durch Verschieben eines Umschalters außer Tätigkeit gesetzt.

Die asynchronen Motoren jeder Art nehmen zu ihrer Magnetisierung einen wattlosen Strom auf, der die Phase des Gesamtstromes gegen die Spannung um einen Winkel φ verschiebt. Sie geben daher auch nur einen im Verhältnis von $1 : \cos \varphi$ verminderten Teil ihrer scheinbaren Leistung $J_p \cdot E_p$ ab.

2. Die Anlaßvorrichtungen für Einphasenmotoren.

Der Einphasenmotor hat wie der Synchronmotor die sehr unliebsame Eigenschaft, daß er im ruhenden Zustande kein Drehmoment entwickelt und daher mit besonderen mechanischen oder elektrischen Anlaßvorrichtungen versehen werden muß.

Da es nur ganz selten möglich ist den Motor von einer laufenden Transmision aus oder durch einen Hilfsmotor in Gang zu setzen, so läßt man meist die Einphasenmotoren als Zweiphasenmotoren

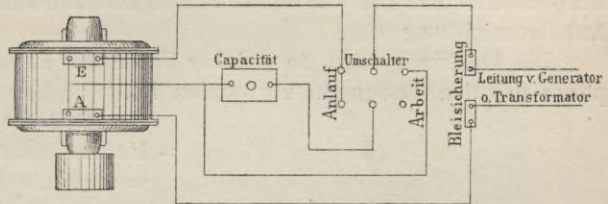


Fig. 337. Verbindung der Schaltvorrichtung eines asynchronen Wechselstrommotors mit der Leitung und dem Motor.

angehen, welche letztere bekanntlich von selbst mit merklichem Anzugsmoment anlaufen, und schaltet, nachdem der Anlauf vollendet ist, die Hilfswicklung aus oder schaltet sie hinter die Hauptwicklung (so z. B. Kummer & Co. und andere).

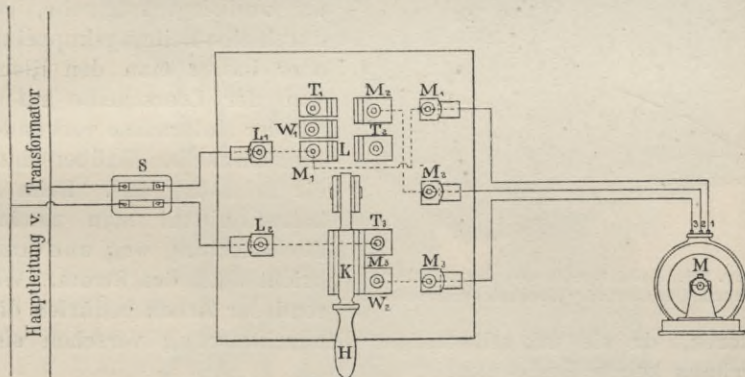


Fig. 338. Schaltvorrichtung der Maschinenfabrik Oerlikon für asynchrone Wechselstrommotoren.

Die gegen die Hauptwicklung räumlich verschobene Hilfswicklung wird durch einen vom Hauptstrom abgezweigten Wechselstrom gespeist, dem man durch Einschaltung einer Kapazität oder einer Selbstinduktion oder durch eigenartige Schaltungen (vergl. die Schaltung von Görge, S. 540) eine zeitliche Phasenverschiebung von möglichst nahe 90° erteilt hat.¹⁾

¹⁾ Einen neuen eigenartigen Weg zum Anlassen asynchroner Wechselstrommotoren hat A. Schwartz, ETZ 1902, S. 795, beschrieben.

Einen anderen Weg, um Einphasenmotoren mit Belastung zum Angehen zu bringen, hat Corsepius, ETZ 1903, S. 1012, vorgeschlagen.

In welcher Weise durch zwei in der Phase verschobene Wechselspannungen, die in zwei gegeneinander versetzten Wickelungen wirken, der Anker eines Elektromotors in Umlauf gebracht werden kann, ist in dem Kap. 20, das sich mit den Zweiphasenmotoren beschäftigt, auseinandergesetzt worden.

Die Fig. 337 stellt z. B. schematisch die Schaltung eines solchen Einphasenmotors mit der einen Flüssigkeitskondensator enthaltenden Anlaßvorrichtung dar.

Die Abbildung zeigt, in welcher Weise die Kapazität in der Hilfsphase mit den Leitungen verbunden ist.

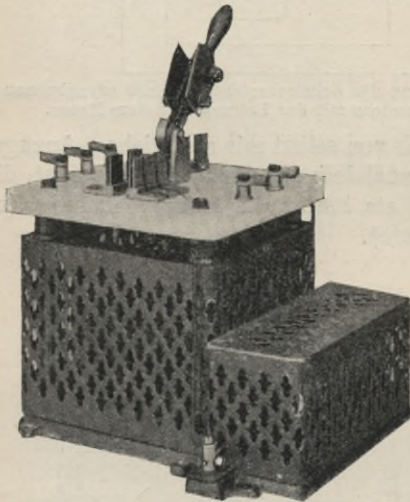


Fig. 339. Anlaßvorrichtung der Maschinenfabrik Oerlikon für Wechselstrommotoren.

Soll die Drehrichtung des Motors geändert werden, so werden die beiden Zuleitungsdrähte in den bei E befindlichen Klemmen vertauscht.

Man läßt mit Hilfe der Anlaßvorrichtung den Motor unbelastet anlaufen, stellt dann den Umschalter auf »Arbeit« um und legt nunmehr, etwa durch eine Reibungskuppelung, oder indem man den Riemen von der Leerscheibe auf die mit der Motorachse verbundene Riemenscheibe hinüberschiebt, die Belastung auf. Beim Anhalten nimmt man zunächst die Belastung weg und unterbricht dann den Strom. Während der Arbeit bedürfen diese

Motoren, da sie mit selbsttätiger Ringschmierung versehen sind, durchaus keiner Bedienung.

Jeder Motor hat drei Klemmen; zwischen den Klemmen 1 und 2 liegt die Hauptphase, zwischen 2 und 3 die Hilfsphase. Bei Inbetriebsetzung des Motors werden die zu beiden Phasen gehörigen Wickelungen parallel und, nachdem der Motor eine genügende Umlaufzahl erreicht hat, hintereinander geschaltet und die zur Erzeugung der Kunstphase dienende Vorrichtung ausgeschaltet. Hierzu dient ein einziger sehr zweckmäßig konstruierter Umschalter. Die Motoren können mit geringer Belastung anlaufen.

Die folgenden Abbildungen zeigen die Anlaßvorrichtung (Fig. 339), sowie die Verbindungen der Schaltvorrichtung mit dem Leitungsnetze und mit dem Motor (Fig. 338).

Bei dem Ingangsetzen eines asynchronen Wechselstrommotors mittels der in Fig. 339 dargestellten Vorrichtung verfährt man in folgender Weise: Bei Stillstand, also vor dem Beginn des Anlaufes,

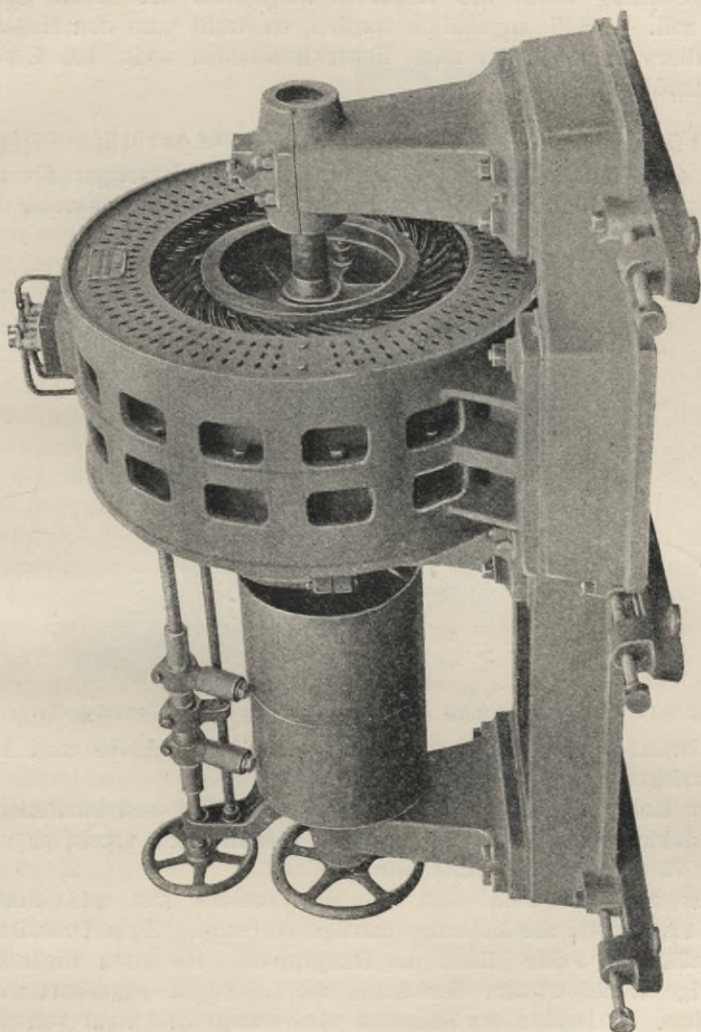


Fig. 340. Asynchroner Einphasenmotor der Maschinenfabrik Oerlikon.

befindet sich der Hebel H in einer mittleren Stellung, sodaß er weder die Kontakte K noch L berührt. Bringt man nun den Hebel in die Lage L, so ist die Hilfsphase eingeschaltet, und der Motor beginnt als Zweiphasenmotor zu laufen. Hat er nach kaum einer Minute die

gewünschte Umlaufzahl erreicht, was man daran erkennt, daß der schwache singende Ton, den der Anker hervorbringt, nicht mehr steigt, so legt man rasch den Hebel in die Stellung K um. In dieser Stellung bleibt der Hebel so lange, als der Motor Arbeit geben soll. — Soll angehalten werden, so dreht man den Hebel in die mittlere Lage, in der seine Kontaktschneiden weder bei K noch bei L berühren.

3. Beschreibung einiger ausgeführter, einphasiger Asynchronmotoren.

In der Abbildung Fig. 340 ist ein größerer derartiger für eine Leistung von 45 PS bestimmter, achtpoliger Asynchronmotor der

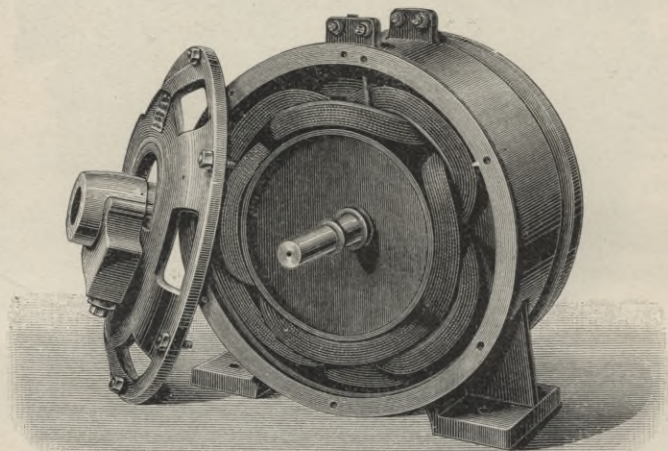


Fig 341. Asynchronmotor mit Kurzschlußanker von Brown, Boveri & Cie.

Maschinenfabrik Oerlikon mit Voll- und Leerscheibe und Ausrückvorrichtung für den Riemen dargestellt.

Der Motor ist für Wechselstrom von 250 Volt und 50 Perioden in der Sekunde bestimmt; unter diesen Verhältnissen macht er vollbelastet 730 Umläufe in einer Minute.

Das ruhende Feld des Ständers besteht aus 144 Stäben ($5,5 \times 12,5 \text{ mm}$), die Bohrung beträgt 600 mm . Zwei Drittel der Ankerdrähte im Felde bilden die Hauptphase; in ihnen fließt der einphasige Wechselstrom, der durch die Leitungen zugeführt wird. Ein Drittel der Drähte des Ständers wird nur beim Anlauf von dem Strome der Hilfsphase durchflossen.

Der Anker besteht aus 168 Stäben (6 mm) und besitzt einen Durchmesser von 598 mm .

Fig. 341 stellt einen 6 pferdigen asynchronen Einphasenmotor von Brown, Boveri & Cie. dar. Der Deckel mit dem Schildlager

ist abgenommen, sodaß man die Ständerwicklung und den Kurzschlußanker sehen kann.

Der Motor ist vierpolig und für 1200 Umläufe in 1 Minute bestimmt. Der zum Betriebe erforderliche Wechselstrom hat eine Spannung von 100 Volt und bei Vollbelastung eine Stärke von 70 Ampère. Der Ständer ist mit 132 Drähten von 25 *qmm* bewickelt. Der Querschnitt des Ständereisens beträgt 220 *qcm*. Der Läufer hat einen Eisenquerschnitt von 200 *qcm* und trägt 36 Stäbe von je 80 *qmm* Querschnitt.

Bei einem ebenfalls vierpoligen Asynchronmotor für $3\frac{1}{2}$ PS und 1200 Umläufe, der von der Maschinenfabrik Oerlikon gebaut ist, beträgt der äußere Durchmesser der Eisenbleche des den Ständer bildenden Ringes 350 *mm*, der innere

Durchmesser oder die Bohrung ist 220 *mm*, die Länge 180 *mm*. Es sind 60 Nuten vorhanden und in diesen liegen 360 Drähte von 4 *mm* Dicke (5 *mm* besp.). Die Tiefe der Nuten beträgt 19 *mm*, die Zahnbreite 8,5 *mm*. Der Kurzschlußanker hat einen äußeren Durchmesser von 218 *mm*, einen inneren Durchmesser von 118 *mm*. Derselbe hat nahe der Oberfläche 50 Löcher von 8 *mm* lichte Weite. In

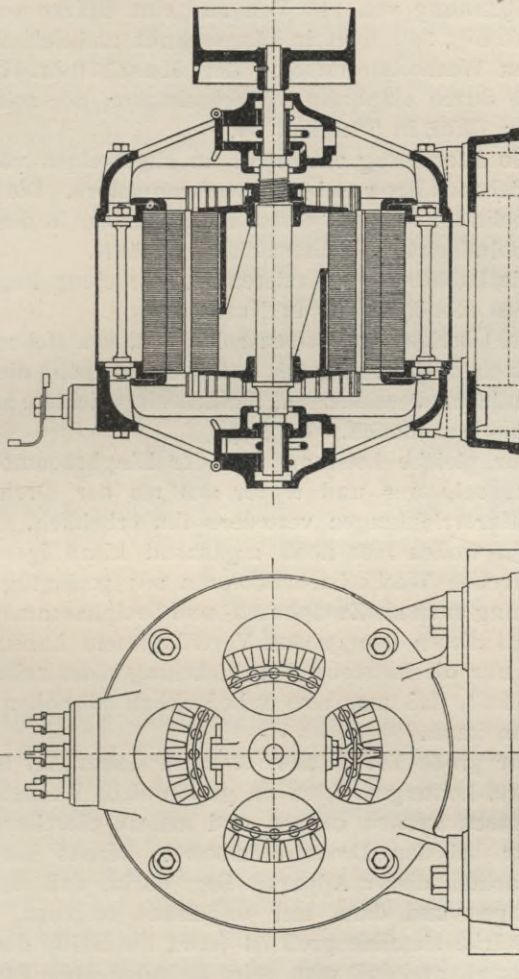


Fig. 342. Asynchronmotor mit Ringwicklung der Maschinenfabrik Oerlikon.

jedem dieser Löcher befindet sich, gut isoliert, ein Kupferstab von 5,8 mm Dicke und 190 mm Länge. Zur Verbindung dieser Stäbe dienen Kupferringe von 216 und 200 mm Durchmesser und 13 mm Dicke. Der zum Betriebe erforderliche Wechselstrom hat bei 40 Perioden eine Spannung von 110 Volt und eine Stärke von 28 Ampère.

Die Fig. 342 zeigt in Längsschnitt und Seitenansicht einen asynchronen Wechselstrommotor der Maschinenfabrik Oerlikon für Betrieb durch einphasigen Wechselstrom, der seit Anfang des Jahres 1893 in Chur in Tätigkeit ist.

Die Anordnung entspricht im allgemeinen völlig der des vorher beschriebenen Brownschen Asynchronmotors. Die induzierende Wickelung befindet sich auf einem Hohlzylinder, in dessen Innenraum der Kurzschlußanker (Eichhornkäfig) umläuft.

Die Drähte der induzierenden Wickelung liegen auf der Innenseite des Hohlzylinders in Nuten.

Bei Überlastung bleiben solche Motoren stehen. Die Vorteile sind aber doch so überwiegend, daß viele Firmen, die sich mit Wechselstromanlagen beschäftigen, ähnlich eingerichtete asynchrone Wechselstrommotoren bauen.

Für gleiche Leistung fällt der Einphasenmotor wesentlich ($\frac{1}{3}$) größer, schwerer und teurer aus als der Drehstrommotor. Auch die Hilfsvorrichtungen verteuern ihn erheblich.

Wir wollen hier noch ergänzend hinzufügen, daß die meisten asynchronen Wechselstrommotoren mit geringfügiger Änderung der Schaltung auch als Zweiphasen- und Dreiphasenmotoren laufen können und mit diesen den großen Vorteil gemein haben, daß der Arbeitsstrom nur die feststehenden Wickelungen des ruhenden Feldmagneten durchfließt, daß man also unbedenklich mit hohen Betriebsspannungen arbeiten kann.

Der große Vorteil aller Motoren dieser Art ist der, daß sie mit nur zwei Leitungsdrähten an gewöhnliche Wechselstromzentralen angeschlossen werden können und nahezu dieselben Vorzüge besitzen, die wir bei den Drehstrommotoren bereits hervorgehoben haben. Der Nachteil dieser Apparate liegt darin, daß sie nur mit Hilfsvorrichtungen und dann nur unbelastet angehen, daß ihre Leerlaufstromstärke ziemlich groß ist (etwa die Hälfte des Stromes bei voller Belastung), und daß man beim Anlaufen hohe Stromstärken braucht und die Zuführungsleitungen, Transformatoren, Meßinstrumente danach bemessen muß. Umlaufzahl und Belastung sind an gewisse Grenzen gebunden.

Zum Schlusse wollen wir noch eine neueste Konstruktion dieser Art, den Heyland-Motor für einphasigen Wechselstrom kurz beschreiben. Derselbe läuft unter Belastung an und braucht dabei nur

etwa das doppelte des Normalstromes und besitzt eine Überlastungsfähigkeit von 50 bis 70 %.¹⁾

Der Motor hat, wie die bisher beschriebenen, eine Hauptwicklung und eine Hilfswicklung, in welche man beim Anlassen Ströme verschiedener Phase sendet. Der Ständer erhält somit zwei Wicklungen, eine Hauptwicklung, bei welcher die Drähte in halbgeschlossenen Nuten liegen, und eine Hilfswicklung in geschlossenen Nuten mit nur wenig Windungen, um ein starkes Feld zu erzeugen. Das Feld der Hilfswicklung ist stärker als das der Hauptwicklung.

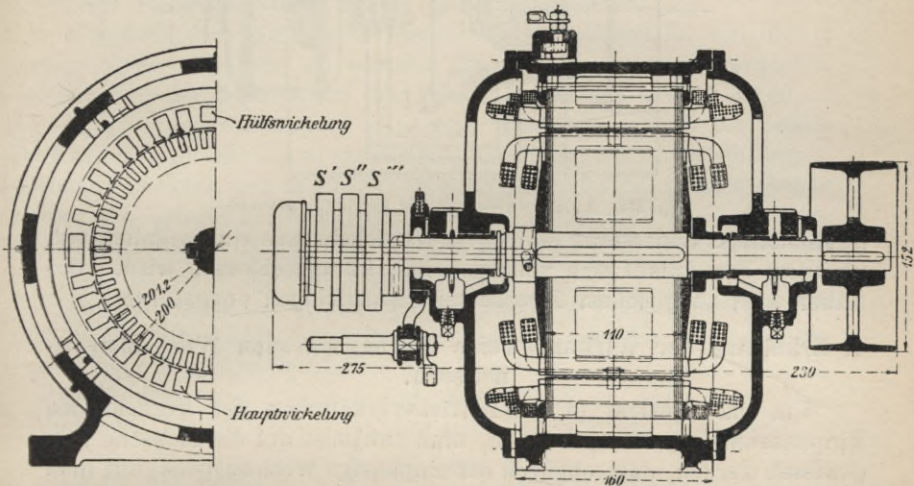


Fig. 343. Schnittzeichnung eines normalen 1 PS-Heyland-Motors.

Beide Felder erhalten schon durch die Streuung eine starke Phasenverschiebung. Der Läufer hat eine Dreiphasenwicklung, deren Enden an die Schleifringe S' S'' S''' angeschlossen sind. Fig. 343 stellt einen solchen kleinen einpferdigen Heylandmotor dar (nach einem Aufsätze von A. Schmidt in ETZ 1903, S. 347).

Fig. 344 zeigt ferner den für diese Motoren erforderlichen Anlasser. Zunächst sind beide Wicklungen parallel geschaltet. Die Bürsten der drei Schleifringe des Läufers führen zu drei Widerständen R' , R'' , R''' , die in den Kasten des Anlassers eingebaut sind. Sobald der Motor nahezu die richtige Umlaufzahl erreicht hat, wird die Hilfsphase ausgeschaltet und durch Weiterdrehen des Umschalters

¹⁾ Da Wechselstrommotoren meist nur geringe Überlastungsfähigkeit besitzen, muß man bei der Wahl der Größe des Motors darauf Rücksicht nehmen, daß z. B. bei Winden und Aufzügen u. dgl. der Reibungswiderstand der Ruhe, der beim Ingangsetzen auftritt, bis nahezu doppelt so groß ist als der Widerstand im Betriebe.

(von links nach rechts) werden dann die Widerstände der Ankerphasen kurz geschlossen.

Die Anlaufstromstärke ist wie bei allen solchen Motoren hoch, deshalb wird bei manchen solchen Maschinen beim Anlassen ein in-

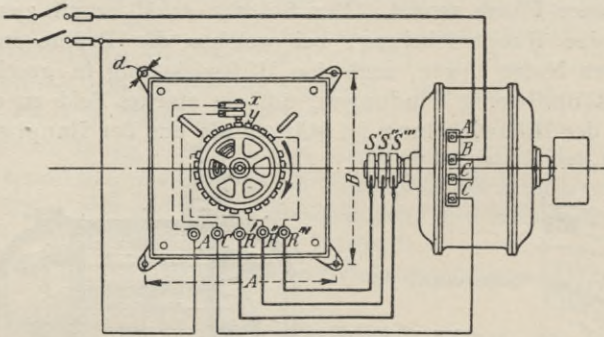


Fig. 344. Anlaufvorrichtung für Heyland-Motoren.

duktionsfreier Widerstand in die Ständerwickelungen eingeschaltet, der, nachdem der Anlauf sich vollzogen hat, kurzgeschlossen wird. Der Anker wird zu gleichem Zwecke mit Schleifringen ausgestattet.

4. Erklärung der Wirkungsweise der asynchronen Wechselstrommotoren.

Um eine Einsicht in die Betriebsverhältnisse der asynchronen Einphasenmotoren zu gewinnen, muß zunächst auf die Tatsache hingewiesen werden, daß, obgleich der einphasige Wechselstrom, mit dem die Ständerwickelung gespeist wird, nur ein magnetisches Wechselfeld, kein magnetisches Drehfeld erzeugt, durch die Rückwirkung des in Bewegung befindlichen Läufers doch ein Drehfeld zustande kommen muß, durch welches der Anker mitgenommen wird.

Wenn man sich auf tiefer gehende, ohne höhere Mathematik kaum vollkommen durchführbare, theoretische Untersuchungen nicht einlassen will, kann man sich doch von den Vorgängen, die in dieser Art von Motoren stattfinden, eine nahezu richtige Vorstellung machen, wenn man das feststehende Wechselfeld mit sinusoidaler Änderung der Felddichte sich in zwei Drehfelder zerlegt denkt,¹⁾ die in entgegen-

¹⁾ Nach Le Blanc, *Lumière électrique* (1892) Bd. 46, S. 654. Die hier gegebene Darstellung folgt wesentlich Roessler, Wechselstrommotoren. Zuerst hat Galileo Ferraris (*Electrician* 1894, S. 110) darauf hingewiesen, daß man ein in seiner Stärke harmonisch sich änderndes, die Richtung gegen die Spulen aber beibehaltendes magnetisches Wechselfeld, wie es ein gewöhnlicher Wechselstrom im Ständer des Einphasenmotors erzeugt, durch zwei in entgegengesetzter Richtung mit gleicher Geschwindigkeit rotierende magnetische Drehfelder ersetzen kann.

In Wirklichkeit handelt es sich übrigens bei dem asynchronen Einphasenmotor um ein elliptisches magnetisches Drehfeld.

gesetztem Sinne mit gleicher Geschwindigkeit rotieren, sodaß während einer vollen Wechselstromperiode der pte Teil einer Umdrehung zurückgelegt wird.

Man kann sich dann den Einphasenmotor durch zwei gegeneinander geschaltete Drehfeldmotoren ersetzt denken.

Wenn der Läufer still steht, umkreisen ihn die beiden Drehfelder mit gleicher Geschwindigkeit in entgegengesetztem Sinne. Beide gleich starke Drehfelder üben dann auf den Läufer gleiche, aber entgegengesetzte Drehmomente aus; der ruhende Läufer bleibt demnach stehen; der reine Einphasenmotor besitzt keine Anzugskraft.

Hat aber der Läufer eine eigene Geschwindigkeit ω_s auf irgend welche Weise erhalten, so werden die beiden Drehfelder ungleich. Die relative Geschwindigkeit des Ankers gegen das eine Drehfeld ist $\omega_p - \omega_s$, gegen das andere $\omega_p + \omega_s$. Dadurch werden die beiden Drehfelder ungleich, das in gleichem Sinne mit der Rotationsrichtung ω_s wirkende Drehfeld nimmt zu, das im entgegengesetzten Sinne wirkende nimmt ab, weil die der treibenden EMK E_p entgegenwirkenden gegen-elektromotorischen Kräfte der beiden Drehfelder im Verhältnis von $\omega_p - \omega_s$ zu $\omega_p + \omega_s$ verschieden werden.

Das im Sinne der Ankerdrehung wirkende Feld überwiegt also und erteilt dem Läufer eine Beschleunigung, bis die Differenz der Drehmomente beider Drehfelder der Belastung gleich geworden ist.

Nach dem, was früher (vergl. Kap. 20, 3, S. 364) über Drehfeldmotoren gesagt worden ist, hat das eine Drehfeld den Wert:

$$D' = K \cdot \Phi'^2 (\omega_p - \omega_s) \dots \dots \dots 1)$$

das andere den Wert:

$$D'' = K \cdot \Phi''^2 (\omega_p + \omega_s) \dots \dots \dots 2)$$

wenn man mit Φ' und Φ'' die Feldstärken der beiden Drehfelder und mit K einen Proportionalitätsfaktor bezeichnet.

Nun verhalten sich aber:

$$\Phi' : \Phi'' = (\omega_p + \omega_s) : (\omega_p - \omega_s) \dots \dots \dots 3)$$

während ihre algebraische Summe immer gleich dem primären Felde Φ sein muß.

Dies ergibt:

$$\Phi' = \frac{\Phi}{2} \cdot \left(1 + \frac{\omega_s}{\omega_p}\right) \text{ und } \Phi'' = \frac{\Phi}{2} \left(1 - \frac{\omega_s}{\omega_p}\right) \dots \dots 4)$$

Bildet man $D = D' - D''$ und setzt die Werte von Φ' und Φ'' ein, so erhält man:

$$D = \frac{K \cdot \Phi^2}{2} \cdot \frac{(\omega_p^2 - \omega_s^2) \cdot \omega_s}{\omega_p^2} \dots \dots \dots 5)$$

Man erkennt aus Gleichung 5), daß das Drehmoment D sowohl null wird, wenn $\omega_s = 0$ wird, d. h. wenn der Läufer still steht, als

wenn $\omega_p^2 - \omega_s^2 = 0$ oder $\omega_p = \omega_s$ wird, d. h. wenn Synchronismus erreicht wird.

Dazwischen erreicht D ein Maximum, welches die Belastungsgrenze des Motors darstellt.

Untenstehende Fig. 345 stellt die durch Gleichung 5) ausgedrückte Abhängigkeit des Drehmomentes D von der Größe ω_s graphisch dar.

Bei Synchronismus des Läufers erzeugt die Induktion in den Läuferwickelungen also neben dem in den Ständerwickelungen erzeugten feststehenden primären Wechselfeld, noch ein zweites, aber in der Phase und räumlich verschobenes Wechselfeld. Je mehr die Schlüpfung $\omega_p - \omega_s$ wächst, um so mehr nimmt dieses sekundäre Wechselfeld ab, bis es null wird, wenn der Läufer still steht.

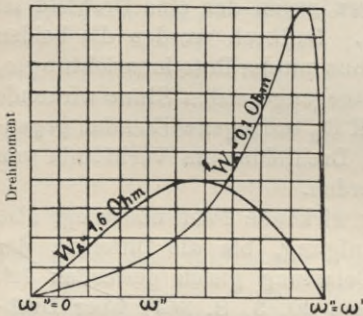


Fig. 345. Abhängigkeit des Drehmomentes eines asynchronen Einphasenmotors von der Winkelgeschwindigkeit des Läufers bei zwei verschiedenen Ankerwiderständen.

Die Zusammenwirkung dieser beiden feststehenden Wechselfelder erzeugt das Drehfeld D, welches den Anker mitnimmt.

Die Tatsache, daß auch beim Einphasenmotor ein Drehfeld entsteht, macht es auch verständlich, daß für den Läufer sowohl Kurzschlußanker, als Phasenanker, und ebenso Phasenanker mit Schleifringen und mit Vorschaltwiderständen für die Ankerwickelungen, überhaupt genau dieselben Anker wie bei Drehstrommotoren verwendet werden können.

Es ist ferner ohne weiteres ersichtlich, daß eine Vertauschung der Stromrichtung die Drehrichtung des Läufers nicht umkehren kann, der Läufer bewegt sich stets in der Richtung weiter, in der ihm der erste Anstoß erteilt worden ist.

Will man Einphasenmotoren also umsteuern, so muß man den Läufer durch anderweite Hilfsmittel bremsen und anhalten, und den Motor dann in entgegengesetzter Richtung anlassen.

Wird $\omega_s > \omega_p$, d. h. wird durch eine besondere Antriebsvorrichtung der Anker rascher gedreht, als dem Synchronismus entspricht, so wird das Drehmoment D, wie Gleichung 5) zeigt, negativ, d. h. der Einphasenmotor liefert dann elektrische Energie an das Netz zurück. Die Energiemenge, die der Motor in solchem Falle als Asynchrongenerator erzeugen kann, ist aber nicht unbegrenzt, sondern erreicht für einen bestimmten Wert von ω_s ein Maximum.

Görges¹⁾ hat gezeigt, daß, wenn man von der Streuung absieht,

¹⁾ ETZ 1895, S. 48.

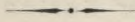
das Drehungsmoment D_e eines Einphasenmotors zu dem Drehungsmoment D_d eines Drehstrommotors von gleichem Widerstand, gleicher Windungszahl und gleichem Energiekonsum in folgendem Verhältnis steht:

$$\frac{D_e}{D_d} = \frac{\left(1 + \frac{\omega_s}{\omega_p}\right) \frac{\omega_s}{\omega_p}}{2} \dots \dots \dots 6)$$

Die Energieverluste durch Ankerstromwärme P_e und P_d stehen im Verhältnis:

$$\frac{P_e}{P_d} = \frac{\left(1 + \frac{\omega_s}{\omega_p}\right)^2}{2} \dots \dots \dots 7)$$

Durch die magnetische Streuung wird das Drehmoment des Einphasenmotors D_e übrigens in noch ungünstigerem Sinne beeinflusst als das des Drehstrommotors.



25. Kapitel.

Kollektormotoren und Reaktionsmotoren.

1. Konduktionsmotoren.

Schon früher erwähnten wir, daß jede gewöhnliche Gleichstrommaschine, deren Feld- und Ankereisen genügend lamelliert ist, mit einphasigem Wechselstrom, allerdings unter starker Funkenbildung an den Bürsten, betrieben werden kann. Auf diesem Gedanken fußend, sind Hauptstrom- und Nebenschlußmotoren für Wechselstrom nach Art der Gleichstrommotoren gebaut worden. Diese und verwandte Konstruktionen werden unter dem Namen Kollektormotoren, Konduktionsmotoren oder Serienmotoren zusammengefaßt.

Es hat sich aber gezeigt, daß die Zuführung des Stromes zum Anker entbehrlich ist, da der in der Feldwicklung verlaufende Wechselstrom einen genügend starken Wechselstrom in der in sich geschlossenen Ankerwicklung induziert. (Vergl. Fig. 335, Kap. 24, 1, S. 433.)

Um nun ein Drehmoment zu erzielen, werden die Ankerwicklungen zu einem Kollektor geführt, und durch breite Bürsten werden eine Anzahl in passender Stellung befindliche Windungen, auf die das Feld eine abstoßende Wirkung ausübt, kurzgeschlossen. Die Fig. 346 stellt schematisch einen zweipoligen Konduktionsmotor dar. An den Stellen, an welchen die in den Windungen entstehenden Induktionsströme eine Drehung des Ankers in entgegengesetztem Sinne veranlassen würden, bleiben die Windungen ungeschlossen. Die Bürsten werden mit ihrer Mittellinie unter 45° (beim zweipoligen Konduktionsmotor) gegen die magnetische Wirkung des Feldes des Primärstromes angestellt.

Es ist hiernach stets nur ein Teil der Ankerspulen wirksam. Man kann, um diesem Übelstande zu begegnen, auch die Bürsten $B' B''$, die am Kollektor anliegen, durch einen Draht oder einen regelbaren Widerstand kurz schließen; dann wirken aber einige Spulen den übrigen entgegen, und es wird dadurch nicht viel gewonnen. Die Motoren gehen von selbst mit Belastung an, ihr Wirkungsgrad aber ist gering, und die Funkenbildung an den Bürsten ist eine sehr störende Erscheinung. Durch verstellen der Bürsten kann man den

Motor bremsen und die Umlaufzahl der Anker regeln.¹⁾ Gelegentlich sind solche Einrichtungen als Hilfsvorrichtungen zur Vermittlung des Anlaufes asynchroner Wechselstrommotoren verwendet worden.

2. Reaktionsmotoren.

Wenn man innerhalb eines magnetischen Drehfeldes einen drehbaren Eisenkörper anordnet, so wird derselbe auch bei völligem Ausschluß von Wirbelströmen sich drehen, dem Drehfelde folgen* und ein Drehmoment ausüben in der Lage sein. Ein solcher Motor wird mit einer gewissen Schlüpfung laufen. Die nach außen abgegebene Arbeit wird dabei gleich der Hysteresisarbeit sein.

Damit hängt zusammen, daß bei Synchronmotoren und Wechselstrommaschinen gelegentlich ganz eigentümliche Erfahrungen gemacht worden sind, die ohne Erinnerung an diese soeben erwähnte Tatsache schwer verständlich sein würden.

Synchronmotoren, welche in verschiedenen Stellungen der Ankerspulen gegen die Elektromagnete sehr verschiedene Selbstinduktion besitzen, haben gelegentlich die auffällige Eigenschaft gezeigt, daß sie in Tätigkeit blieben, auch unter Belastung, wenn die Felderregung unterbrochen war. Ebenso haben auch Wechselstrommaschinen noch Strom geliefert, nachdem die Erregung der Magnete weggenommen war.

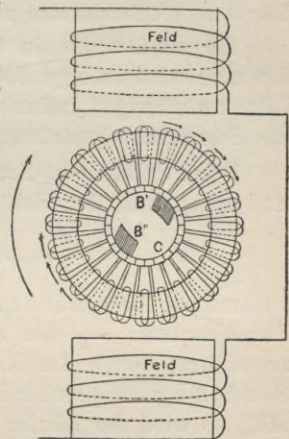


Fig. 346.
Zweipoliger Konduktionsmotor.

Die Ankerrückwirkung war es, welche in solchen Fällen die Magnetisierung der Kerne der stromlosen Elektromagneten, die Selbsterregung bewerkstelligte. Es ist dies nur in Fällen erklärlich, wenn beim Synchronmotor der Strom sehr stark gegen die Klemmenspannung verzögert ist, oder wenn bei der Wechselstrommaschine durch Arbeit auf einen kräftigen Kondensator oder einen übererregten Synchronmotor der Strom eine starke Voreilung gegen die Spannung besitzt.

Man hat auch diese Tatsache zur Konstruktion von Wechselstrommotoren zu verwenden gesucht und nennt derartige Vorrichtungen Reaktionsmotoren. Da ihr Wirkungsgrad niedrig (40 %) ist, haben dieselben außer in ganz besonderen, praktisch unwichtigen Fällen bisher keine Bedeutung gewonnen.

¹⁾ Eine verhältnismäßig einfache Theorie dieser Motoren hat Osnos ETZ 1903, S. 903, gegeben.

3. Der Kollektor als Frequenzwandler.¹⁾

Wenn man einige vereinfachende Annahmen einführt, die keine zu weite Entfernung von den tatsächlichen Verhältnissen bedeuten, lassen sich auch die Verhältnisse des mit Drehstrom betriebenen Kollektormotors, das Diagramm desselben und seine Beziehungen zum gewöhnlichen Drehfeldmotor leicht verständlich machen.

Die wichtigste Vereinfachung soll darin bestehen, daß von der Streuung des im Läufer erzeugten Magnetfeldes abgesehen wird.

Der Kollektormotor unterscheidet sich vom gewöhnlichen Drehfeldmotor oder seinem Induktionsmotor dadurch, daß der Läuferwicklung des Kollektormotors durch auf dem Kollektor schleifende Bürsten Wechselstrom zugeführt wird.

Es sind somit in der Läuferwicklung zwei EMKräfte tätig; die eine wird infolge der Schlüpfung des Läufers im Drehfeld in den Läuferwindungen induziert, die andere EMK wird von außen durch die Bürsten aufgedrückt.

Die Periode \sim_2 dieser beiden Wechselspannungen ist die gleiche und hängt mit der Schlüpfung s durch die Gleichung:

$$s = u_1 - u_2 = \frac{\sim_1 - \sim_2}{2p} \cdot 60$$

zusammen. Den Bürsten des Kollektormotors wird Wechselstrom von der Frequenz \sim_1 des den Ständer durchfließenden Primärstromes zugeführt; durch den Kollektor aber wird diese Frequenz auf die der Schlüpfung entsprechende Frequenz \sim_2 erniedrigt. Steht der Läufer still, so wird der Läufer ebenfalls von Wechselstrom von der Frequenz \sim_1 durchflossen, es wird $\sim_2 = \sim_1$. Dreht sich der Läufer mit dem magnetischen Drehfeld des Ständers synchron, so wird in den Läuferwindungen keine EMK induziert und der durch die Bürsten zugeführte Wechselstrom wird in Gleichstrom d. h. einen Wechselstrom von der Frequenz $\sim_2 = 0$ umgesetzt. Die Impedanz des Läufers reduziert sich dann auf den Ohmschen Widerstand. Der Kollektor spielt somit im Wechselstromkreis die Rolle eines Frequenzwandlers.

Die Wicklung des Läufers eines Kollektormotors ähnelt außerordentlich der des Ankers einer Gleichstrommaschine.

Der von den beiden im Anker tätigen EMKräfte erzeugte Strom hat nun einerseits den Ohmschen Widerstand w_2 des Ankers und andererseits den scheinbaren Widerstand, die Impedanz desselben zu überwinden.

¹⁾ Wir folgen hier in der Hauptsache dem Gedankengange einer wertvollen Abhandlung von E. Adler (Wien): »Die Theorie des Induktions- und Kollektormotors«, Elektrotechn. Anzeiger, Bd. XX, 1903, No. 81, 82, 83.

Zwischen der im Anker tätigen resultierenden EMK E und dem erzeugten Felde Φ besteht nun (vergl. Kap. 2, 2, S. 29, Gleich. 13) die Beziehung:

$$E = 4,44 \cdot \Phi \cdot \omega_2 \cdot n_2 \cdot 10^{-8} \text{ oder } \Phi = \frac{E \cdot 10^8}{4,44 \cdot n_2 \cdot \omega_2}.$$

Hierin ist n_2 die Windungszahl im Läufer.

Da die Schlüpfung bei Kollektormotoren unter sonst gleichen Verhältnissen und bei gleicher Belastung noch geringer ist als beim reinen Induktionsmotor und auch bei diesem außer bei Anlauf nur wenige Prozent beträgt, so ist ω_2 eine sehr kleine Zahl. Das Feld Φ kann somit durch eine sehr niedrige EMK erzeugt werden, die dem Kollektor durch einen die Netzspannung stark herabsetzenden Transformator zugeführt wird. Für eine niedrige Spannung aber genügen wenige Kollektorlamellen, um einen nahezu funkenfreien Gang herbeizuführen. Außerdem sind die voneinander isolierten Kollektorlamellen an den Heylandschen Kollektormotoren noch durch Widerstände verbunden, die vollends darauf hinwirken die Neigung zur Funkenbildung zu unterdrücken, sonst aber den Charakter der Läuferwicklung nicht erheblich verändern.

Wir sagten schon vorher, daß der durch den Kollektor zugeführte Strom in Gleichstrom verwandelt wird, wenn der Läufer sich synchron mit dem Drehfelde dreht. Es gibt dann keine Reaktanz mehr und der Widerstand der Läuferwicklung beschränkt sich auf den Ohmschen Widerstand.

Bewegt sich der Läufer mit Schlüpfung, so kommt die Selbstinduktion des Läufers zur Geltung und der induzierte Strom bleibt hinter der induzierenden Spannung in der Phase zurück.

Wird aber durch äußere Hilfsmittel der Läufer rascher gedreht als dem Synchronismus entspricht, so gibt der Läufer durch die Bürsten und den vorgeschalteten Transformator Strom an das Netz zurück. Der Strom eilt dabei der Spannung voraus. Bei übersynchroner Bewegung ist daher der Apparat ein asynchroner Generator und wirkt wie ein in das Verteilungsnetz eingeschalteter Kondensator. Derartige asynchrone Generatoren werden bereits seit einiger Zeit gebaut (z. B. von Brown, Boveri & Cie., Kolben & Co., Brush Electrical Engineering Co., Cie. Française Thomson-Houston und andere) und dürften bald eine ihrer Bedeutung entsprechende, hervorragende Stellung in der Wechselstromtechnik einnehmen.

4. Die Kompensierung der wattlosen Ströme.

Bisher haben wir noch gar nicht in Betracht gezogen, wie die Bürsten stehen sollen, durch welche der Wechselstrom durch den Kollektor den Läuferwindungen zugeführt wird, und doch ist dies

von großer Wichtigkeit für den Phasenunterschied des im Ständer fließenden und des dem Läufer zugeführten Stromes.

Bekanntlich sind die Ströme in den Wechselstromnetzen meist gegen die Spannung in der Phase verschoben; die Leitungen führen daher eine erhebliche wattlose Stromkomponente, die viele erhebliche Nachteile, zumal wenn die Selbstinduktion überwiegt, starken Spannungsabfall in den Transformatoren im Gefolge hat.

Der Magnetisierungsstrom eines Motors entspricht der durch Selbstinduktion verursachten Reaktanzspannung der Ständerwicklung und dient wesentlich dazu das im Luftspalt vorhandene gemeinsame Nutzfeld F (vergl. Kap. 22, 8, S. 399) zu erzeugen. Jedes Feld ist aber bekanntlich gleich dem Quotienten aus wirksamer magnetomotorischer Kraft durch den Widerstand des magnetischen Kraftlinienweges (vergl. Gleichstromtechnik Kap. 4, 4, S. 129 und 7, S. 134). Den Hauptteil dieses magnetischen Widerstandes bildet der von den wirksamen Kraftlinien zu überschreitende Luftspalt zwischen Innenfläche des Ständers und Außenfläche des Läufers. Wir machen deshalb bei allen Motoren diesen Spalt möglichst schmal.

Der Ständerwicklung wird aber der primäre Strom von der verhältnismäßig hohen Frequenz \sim_1 zugeführt, es ist daher eine ziemlich hohe Reaktanzspannung erforderlich, um das Feld Φ_1 (vergl. S. 399) zu erzeugen. Wenn wir, wie vorausgesetzt wird, von der sekundären Streuung absehen, ist das Nutzfeld identisch mit dem Felde, welches durch Induktion Strom im Läufer hervorruft. Es entsteht durch Zusammensetzung aus dem Ständerfelde und dem Läuferfelde. Es kann das Nutzfeld F aber auch durch Vergrößerung des Läuferfeldes erreicht werden.

Wenn wir nun dem Läufer von außen durch den Kollektor Strom zuführen, braucht dieser Strom, der zur Erzeugung der Zugkraft (gleich Nutzfeld mal Läuferstrom) nötig ist, nicht durch Induktion durch das Nutzfeld erst erzeugt zu werden.

Eine Spannung von wenigen Volt, die wir einem geeigneten Transformator oder einer Abzweigung der Ständerwicklung entnehmen, genügen wegen der im Läufer herrschenden niedrigen Frequenz vollständig, um ein kräftiges Luftfeld F und einen starken Läuferstrom hervorzurufen. Durch Wahl einer geeigneten Spannung können wir immer einen Läuferstrom von passender Stärke herstellen. Der Ständer braucht dann nicht mehr den Magnetisierungsstrom aufzunehmen, und das Verteilungsnetz wird von wattlosen Strömen entlastet.

Bei Synchronismus verschwindet die Selbstinduktion, und die Impedanz der Läuferwicklung reduziert sich auf den Ohmschen Widerstand. Ist die Spannung, die wir durch die Bürsten dem Läufer

aufdrücken, E_2 , so wird im Läufer ein auf den Ständer mit dem Umsetzungsverhältnis u reduzierter zusätzlicher Läuferstrom $\frac{u \cdot E_2}{w_2}$ erzeugt.

Durch das Anlegen der Bürsten an verschiedene Stellen der Läuferwicklung (vergl. Fig. 347) haben wir aber die Möglichkeit diesem zusätzlichen Läuferstrom eine beliebige zeitliche Phasendifferenz gegen die im Ständer wirksame EMK E_1 zu erteilen.

Hätte z. B. der Läuferstrom durch Wahl eines passenden Winkels α (Fig. 347) für die Läuferbürsten gerade eine Phasendifferenz von 90° gegen die im Ständer wirkende Spannung, so wäre er in bezug auf diese Spannung ein rein wattloser Strom.

Da die Ständerwicklung Selbstinduktion hat, entsteht stets ein nachteiliger wattloser Strom. Schieben wir nun die Bürsten vorwärts in der (Fig. 347) durch den Pfeil angezeigten Drehrichtung (statt rückwärts, wie es in der Figur gezeichnet ist), so kann man es stets erreichen, daß der auf den Stator reduzierte wattlose Läuferstrom den wattlosen Ständerstrom gerade aufhebt, sodaß in den Statorwindungen ein rein wattloser Strom fließt.

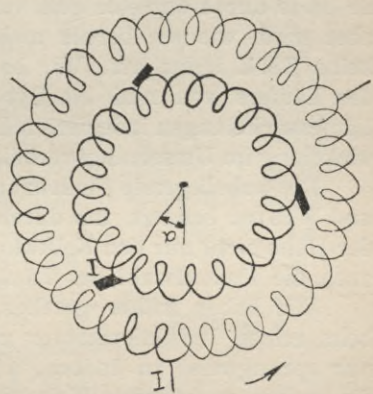


Fig. 347. Bürstenverschiebung beim Kollektormotor.

Die Verhältnisse bleiben auch bei verschiedenen Läuferstellungen immer dieselben, da immer andere Windungen unter die Bürsten kommen, für die dasselbe gilt wie für den Zustand, den wir soeben betrachtet haben.

Man kann demnach Kollektormotoren immer so kompensieren, daß primäre Spannung und Strom im Ständer keine Phasenverschiebung besitzen; derartige Motoren arbeiten dann mit einem Leistungsfaktor $\cos \varphi = 1$ und sind dadurch den reinen Induktionsmotoren, den gewöhnlichen Drehstrommotoren, wesentlich überlegen.

5. Die Regelung der Umdrehungszahl bei Kollektormotoren.

Wir erwähnten früher, daß man bei reinen Induktionsmotoren für die Anlaufperiode gewöhnlich mit Hilfe von Schleifringen Widerstände in die Läuferwicklung einschaltet, um ein übermäßiges Anwachsen des Stromes im Läufer zu verhindern.

Bei großer Schlüpfung wird nämlich eine hohe EMK im Anker induziert, weil die Frequenz $\sim \omega_2$ im Läufer gar nicht oder noch wenig

von der im Ständer \sim_1 verschieden ist. Der hierdurch verursachte starke Strom im Läufer kann aber einfacher, als durch Einschaltung von Widerständen dadurch vermieden werden, daß man eine entgegengesetzt gerichtete EMK durch Bürsten und Kollektor den Läuferwindungen aufdrückt. Diese von außen zugeführte EMK wird von selbst durch den als Frequenzwandler dienenden Kollektor auf die Frequenz des im Läufer induzierten Wechselstromes transformiert.

Durch einen Transformator mit regelbarem Umsetzungsverhältnis kann man die Größe der aufgedrückten EMK nach Bedarf bemessen und Anlaßapparate anderer Art nahezu vollständig entbehrlich machen.

Bei Stillstand ist die im Läufer induzierte EMK, im Umsetzungsverhältnis reduziert, gleich der im Ständer vorhandenen EMK E_1 , da beide durch dasselbe Feld verursacht werden. Bei Synchronismus aber wird, wie wir bereits mehrfach erwähnt haben, im Läufer gar keine EMK induziert. Wir haben also im Geschwindigkeitsbereiche des Läufers von null bis Synchronismus ein Abfallen der in den Läuferwickelungen induzierten EMK von der Höhe der auf die Primärwicklung im Umsetzungsverhältnis reduzierten Spannung E_1 bis null.

Die naheliegende Umkehrung dieses Gedankens haben Eichberg und Winter benutzt, um durch Zuführung einer EMK von wechselnder Höhe nicht nur den Kollektormotor allmählich anzulassen, sondern auch die Umlaufzahl des Läufers in weiten Grenzen zu regeln.

Wir haben früher gesehen, welche umständliche Einrichtungen beim reinen Induktionsmotor nötig waren, um die Tourenzahl auch nur sprungweise zu ändern, während sich beim Kollektormotor auf die soeben angedeutete Weise die Möglichkeit ergibt, die Umlaufzahl ganz beliebig und allmählich zu regeln. Dies ist ein weiterer sehr erheblicher Vorzug der Kollektormotoren vor den Drehstrominduktionsmotoren. Verfolgt man außerdem den Stromverlauf beim Kollektormotor vom Läufer durch den regelbaren Transformator bis zum Verteilungsnetz, so findet man, daß die im Läufer induzierte elektrische Energie durch Kollektor, Bürsten und Transformator dem Verteilungsnetz wieder zurückgegeben wird.

6. Kreisdiagramm des Kollektormotors.

Wir zeichnen zunächst aus Fig. 307 S. 399, mit gestrichelten Linien das Kreisdiagramm des Induktionsmotors noch einmal.

Um nun außerdem das Diagramm des Kollektormotors zu erhalten, müssen wir berücksichtigen, daß in der Läuferwicklung zwei EMKräfte tätig sind, die durch Induktion hervorgerufene und die vom Kollektor aus durch Leitung¹⁾ oder Konduktion aufgedrückte.

¹⁾ Daher rührt der von einigen Autoren für diese Apparate gebrauchte Name Konduktionsmotoren.

Im Endpunkte φ dieses Vektors haben wir senkrecht zur Richtung des Läuferfeldes (was, sofern wir von der Läuferstreuung absehen, mit F zusammenfällt), also parallel zu GD eine Gerade zu legen und den Schnitt dieser Geraden mit der Verlängerung der Richtung des Rotorfeldes F zu suchen. Dann ist COA der Vektor, durch den der Primärstrom i_s nach Größe und Richtung dargestellt wird. Über OS schlagen wir nun den Halbkreis; auf diesem muß A liegen, weil bei A ein rechter Winkel liegt. Dieser Kreis ist der charakteristische Kreis des Kollektormotors.

Bei Leerlauf, d. i. bei Synchronismus, fließen im Läufer keine Wechselströme. Die Strecke i_0 , die dem Magnetisierungsstrom in diesem Falle beim reinen Induktionsmotor entspricht, muß also auch beim Kollektormotor dieselbe sein, weil es bei Synchronismus gerade so ist, als ob kein Kollektor vorhanden wäre. Aber auch bei festgebremstem Läufer wird der Magnetisierungsstrom CO der gleiche bleiben, gleichviel ob die Bürsten am Kollektor anliegen, oder ob dies nicht der Fall ist.

Aus diesem von E. Adler¹⁾ aufgestellten Diagramm lassen sich eine Anzahl wesentlicher Eigenschaften des Kollektormotors (starke, ausgezogene Linien) herleiten, und ebenso sind Vergleiche mit dem reinen Induktionsmotor (gestrichelte Linien) möglich. Der Kollektormotor wird zum Induktionsmotor, wenn man die Bürsten vom Kollektor abhebt.

Die Gerade CP stellt sichtlich die primäre Stromstärke i_1 in dem Falle des kompensierten Motors vor, wenn $\varphi_1 = 0$, also $\cos \varphi_1 = 1$ ist.

Die Belastung resp. die Zugkraft ist bekanntlich proportional der Länge des Lotes auf das Feld F_1 . Ändern wir die Belastung, so ändert sich die Lage des Punktes A , er fällt dann nicht mehr mit P zusammen. Die Phasenkompensierung gilt daher jedesmal nur für eine bestimmte Belastung. Wir können aber bei Störung der Kompensation diese sofort wieder herstellen, indem wir entweder die Stärke des zusätzlichen Magnetisierungsstromes, d. i. die Länge von BC oder die Richtung von BC , die durch den Bürstenwinkel α bestimmt wird, ändern. (Vergl. Fig. 347).

Da die Lote von A auf F_1 die Zugkraft oder die Belastung messen, so sieht man leicht, daß ein Motor, als Kollektormotor verwendet, eine viel größere höchste Belastungsfähigkeit besitzt, als wenn man ihn als Induktionsmotor verwendet. Die maximale Belastung (abgesehen von Verlusten) des letzteren wird durch den

Radius $\frac{OG}{2}$ des gestrichelten Kreises gemessen.

¹⁾ Elektrotechnischer Anzeiger, Bd. XX, 1903, Heft 83. Man vergl. auch Blondel, Eclairage électrique 1903, Heft 17, 18, 23 und Heyland, ETZ 1903, Heft 30.

Während beim Induktionsmotor die Höchstbelastung nur bei ungünstigem Leistungsfaktor $\cos \varphi$ erreicht werden kann, ist es möglich den Kollektormotor auch für die Maximalzugkraft zu kompensieren.

Das Verhältnis der größtmöglichen Belastung zur normalen bezeichnet man vielfach als die Stabilität des Motors, den reziproken Wert als Überlastungsfähigkeit. — Die Überlastungsfähigkeit wird sonach durch Gebrauch des Kollektors wesentlich erhöht.

Läuft der Motor genau synchron, so wird die durch Schlüpfung induzierte EMK null; infolgedessen wird auch der hierdurch induzierte Teilstrom i_s gleich null. Der Punkt A in Fig. 348 rückt deshalb nach S. Dieser Punkt heißt daher Synchronpunkt. Man sieht, daß der Kollektormotor, auch wenn er synchron läuft, noch immer Arbeit leistet; erst bei Übersynchronismus rückt A soweit unter S, daß der Motor keine Arbeit mehr abgeben kann.

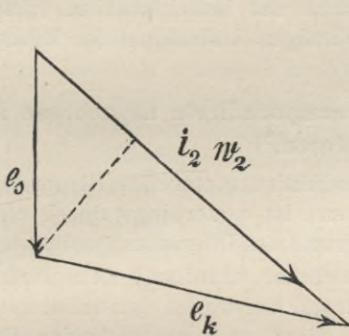


Fig. 349. Tätigkeit als Motor.

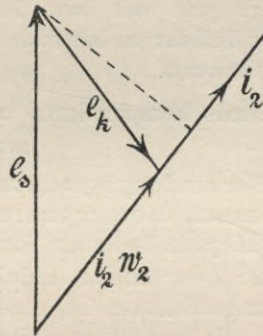


Fig. 350. Tätigkeit als Generator.

Die Lage des Synchronpunktes S hängt ab von der Stärke des Kompensationsstromes $i_k = \frac{u \cdot E_2}{w_2}$. Fällt A in die Gerade OE_1 , so ist der Motor für wattlose Ströme kompensiert, primäre Spannung und Ständerstrom sind in Phase. Liegt A in der Figur unter OE_1 , so eilt der Strom in der Phase der Spannung nach; liegt A in der Drehrichtung der Vektoren über OE_1 hinaus, so eilt der Strom der Spannung voraus. Man kann also durch Übererregung des Kollektormotors durch den Strom, der durch den Kollektor fließt, phasenvoreilenden Strom in das Netz zurückgeben und dadurch das ganze Verteilungsnetz auf $\varphi = 0$ kompensieren.

Beim Kollektormotor sind im Läufer immer zwei EMKräfte vorhanden, wovon die eine von der Schlüpfung herrührt, die andere durch den Kollektor von außen aufgedrückt wird. Die letzere behält, solange die Bürsten ihre Stellung behalten, ihre Richtung immer bei, die erstere wechselt ihre Richtung beim Synchronismus.

Wirken im Diagramm der EMK im Läufer beide EMKräfte e_k und e_s in gleichem Sinne und fällt ihre auf den Läuferstrom projizierte Richtung mit dem Läuferstrom J_2 zusammen, so wirkt der Apparat als Motor, er gibt positive Leistung ab (vergl. Fig. 349).

Dreht sich der Läufer mit erheblichem Übersynchronismus, so haben e_s und e_k verschiedene Richtung; die Maschine wirkt dann als asynchroner Generator und liefert durch Ständer und Kollektor Strom in das Netz zurück (Fig. 350).

Steht endlich e_k gerade senkrecht auf dem Strom J_2 , so arbeitet die Maschine als selbsterregender Generator.

Alle diese Eigenschaften lassen erkennen, daß der asynchrone Kollektormotor und -generator ein in der Wechselstromtechnik außerordentlich vielseitig verwendbarer Apparat ist, der nach vielen Hinsichten dem gewöhnlichen Drehstrommotor erheblich überlegen ist. Allerdings geht mit dem Gebrauche des Kollektors ein nicht unwichtiger Teil der so bewundernswürdigen Einfachheit des Drehstrommotors verloren.

7. Heylands kompensierte und compoundierte asynchrone Motor- generatoren.¹⁾

Die Verwendung asynchroner Induktionsmotoren als Stromerzeuger, als sogenannte Motorgeneratoren, ist neuerdings durch eine Erfindung Heylands in den Vordergrund des Interesses gerückt worden.

Jeder gewöhnliche Induktionsmotor entnimmt dem Netze, an das er angeschlossen ist, einen Strom, der wegen der wattlosen Komponente, die zur Magnetisierung dient und um 90° der Primärspannung nacheilt, gegen die Primärspannung um einen gewissen Winkel φ in der Phase verzögert ist. Wirkt der Motor aber bei übersynchronem Gang seines Läufers als Stromerzeuger, so besitzt der Strom gegen die Spannung eine entsprechende Voreilung.

Diesem Übelstande beugt Heyland dadurch vor, daß er das Drehfeld des asynchronen Motors im Läufer erzeugt, indem er dem Läufer eine Wickelung gibt, der durch einen Kommutator und Bürsten ein Teil des Primärstromes, eventuell unter Reduktion der Spannung durch einen Transformator, zugeführt wird. Diese Läuferwickelung bildet

¹⁾ ETZ 1902, Bd. XXIII, S. 560. Einen Kollektordrehfeldmotor hatte früher schon Gorges (ETZ 1891, S. 701) vorgeschlagen. Auf Anker mit Überbrückung der Kollektorlamellen durch induktionsfreie Widerstände oder die Anordnung von Kurzschlußwindungen auf dem Anker zur Vermeidung von Funkenbildung am Kollektor ist durch D. R.-P. 127 271 (1900) bereits Haßlacher in Frankfurt a. M. Patentschutz gewährt. Es handelt sich in beiden Fällen um frühere Erfindung von Teilen der Heylandschen Konstruktion. Die Verwendung zu dem oben angegebenen Zwecke und in dieser Form ist aber völlig neu. Viele grundlegende Gedanken finden sich jedoch schon bei Atkinson (1895—98). Vergl. Osnos, ETZ, 1904. S. 1.

einen Nebenschluß zur Hauptwicklung des Ständers oder eines Teiles derselben, und liegt parallel zur Kurzschlußwicklung des Läufers, mit der sie direkt oder indirekt in leitender Verbindung steht.

Wenn der Läufer ruht und gleiche Windungszahl wie der Ständer hat, würde dadurch nichts gewonnen sein, denn im Läufer würde die Wechselzahl dieselbe sein wie im Ständer und dieselbe EMGegenkraft auftreten und denselben scheinbaren Energieaufwand beanspruchen.

Wenn aber der Läufer sich mit geringer Schlüpfung dreht, so ist dann die Wechselzahl des Magnetfeldes, welches im Läufer entsteht, der Schlüpfung entsprechend, nur sehr gering, und demgemäß ist auch die zur Magnetisierung erforderliche EMK nur gering.

Der zur Magnetisierung dem Läufer zuzuführende Strom beträgt daher nur wenige Prozent, während zur Magnetisierung des Ständers Ströme gehören, die bei guten Maschinen noch einer scheinbaren Leistung von 30 bis 40 % der gesamten Maschinenleistung entsprechen.

Man zweigt den zur Magnetisierung des Läufers nötigen Strom daher entweder von nur wenigen Windungen des Ständers ab, oder entnimmt ihn einem Hilfstransformator, der die Klemmenspannung entsprechend reduziert.

Dadurch, daß man dem Läufer stärkere Ströme zuführt, als zur Kompensation der wattlosen Komponente des Ständers nötig ist, kann man einen solchen Motor übererregen, sodaß nicht nur die eigenen wattlosen Ströme kompensiert werden, sondern Ströme mit solcher Phasenvoreilung an das Netz abgegeben werden, daß der Spannungsabfall durch anderweite induktive Belastung gerade ausgeglichen wird.

Die Anordnung, wie die Kompensation bewerkstelligt werden kann, ist durch die schematischen Fig. 351 und 352 erläutert. Ent-

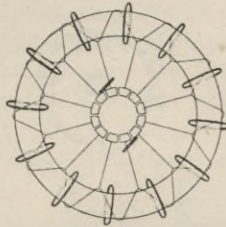


Fig. 351.

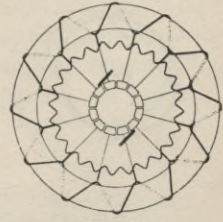


Fig. 352.

Kompensationseinrichtung an Kollektormotoren.

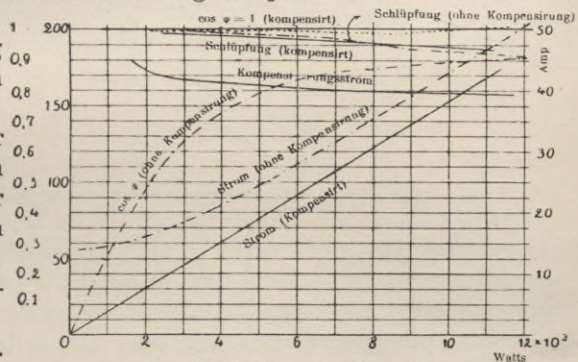


Fig. 353. OS-Motor der Vereinigten Elektrizitäts-Aktiengesellschaft, kompensiert auf $\cos \varphi = 1$.

weder man legt auf die Kurzschlußwicklung des Läufers außer den in sich geschlossenen Windungen noch eine zweite Wickelung, die zum Kollektor führt (Fig. 352), oder man schließt die Wickelung des Läufers nicht kurz, sondern durch einen Ring von Leitern, deren Widerstand zu dem der Wickelung in einem gewissen Verhältnis steht, und verbindet diesen Schlußring mit dem Kommutator. Die zweite

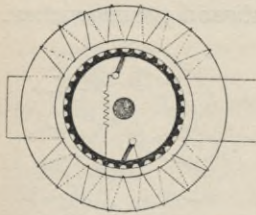


Fig. 354.

Heylandsche Kollektormotorgeneratoren.

Kompensiert ohne Kompoundierung.

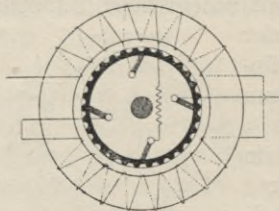


Fig. 355.

Kompensiert und kom-poundiert.

Anordnung (Fig. 351) ist vorzuziehen, weil der Schlußring alle Unregelmäßigkeiten der kommutierten Erregerströme ausgleicht. Der Kommutator erhält nur 4 bis 6 Lamellen pro Pol und arbeitet wegen seiner

Verbindung mit der Kurzschlußwicklung völlig funkenfrei.

Das Diagramm Fig. 353 zeigt das Verhalten eines einphasigen asynchronen Motors vor und nach der Kompensation nach dem Heylandschen Vorschlage.

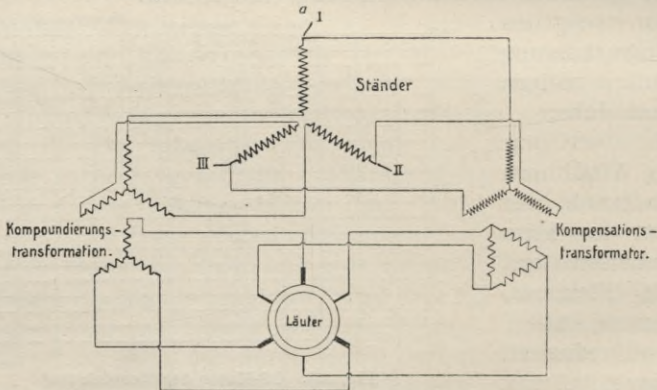


Fig. 356. Schaltung eines Heylandschen Dreiphasen-Motorgenerators.

Solche Maschinen können durch einen zweiten Zusatz auch gegen wattlose Belastung durch unbelastete Transformatoren und leerlaufende Motoren dadurch vollständig kom-poundiert werden, daß man außer dem zur Erregung des Läufers dienenden, sogenannten Kompensationsstrom auch noch den Hauptstrom dem Läufer in geeigneter Weise zuführt, sodaß er die Ampèrewindungen des Ständers in jedem Falle aufheben muß. Fig. 354 und 355 erläutern die Anordnung für eine zweipolige, einphasige Maschine.

In der Fig. 356 ist für einen kompensierten und kompondierten Drehstrommotor die Schaltung angegeben. Um für verschiedene Betriebsspannungen stets gleichartig gewickelte Läufer verwenden zu können, wird zwischen Ständer und Läufer ein Transformator geschaltet, der den zur Kompoundierung im Läufer verwendeten Strom auf die passende Spannung umsetzt.

Die Einstellung auf Kompoundierung geschieht in folgender Weise. Man läßt die Maschine laufen und erregt sie für Leerlauf durch richtige Einstellung der Kompensationsbürsten. Dann belastet man die Maschine rein wattlos und regelt das Umsetzungsverhältnis des Kompoundierungstransformators derartig, daß die Spannung bei Ein-

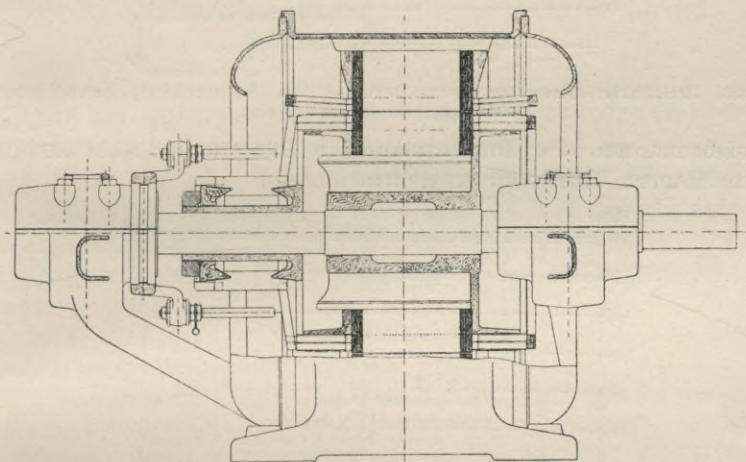


Fig. 357. Kompoundierter Asynchron-Dreiphasengenerator von 100 PS der A.-G. Brown, Boveri & Cie.

und Ausschaltung der Belastung völlig gleich bleibt. Hierauf belastet man die Maschine mit Wattströmen und stellt nunmehr die Bürsten so ein, daß sie die Streuung berücksichtigen, und wieder die Spannung bei Ein- und Ausschalten der Last gleich bleibt. Ist dies vollendet, so ist die Maschine vollständig und für jede Art der Belastung auf unveränderliche Spannung kompondiert.

In Fig. 357 ist ein auf diese Weise eingerichteter asynchroner, kompondierter Dreiphasengenerator für 100 PS der Aktiengesellschaft Brown, Boveri & Cie. abgebildet.

Das Diagramm Fig. 358 zeigt die Abhängigkeit der Spannung dieser Maschine von der Erregung bei Leerlauf, bei Belastung mit wattlosem Strome ($\cos \varphi = 0$) und bei induktionsfreier Belastung ($\cos \varphi = 1$).

Das Diagramm 359 läßt die Konstanz der Spannung bei verschiedenartiger Belastung erkennen.

Der große Vorteil dieser Motorgeneratoren ist der Wegfall der Erregermaschine, außerdem können dieselben dazu dienen die Phasendifferenzen auszugleichen, die in Verteilungsnetzen durch leerlaufende

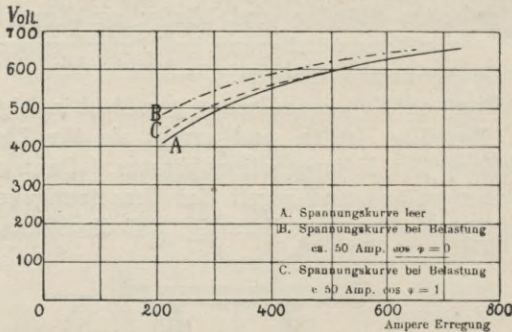


Fig. 358. Dreiphasen-Generator Brown, Boveri & Cie., kompondiert, Spannungskurve abhängig von der Erregung.

Transformatoren oder durch anlaufende Motoren und nicht kompen-sierte Motoren überhaupt entstehen.

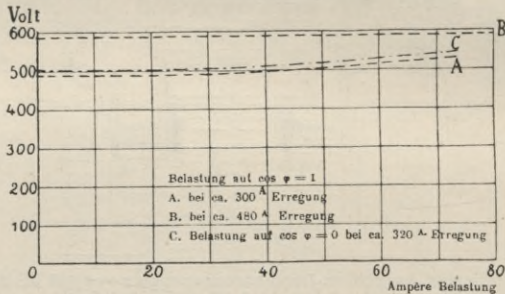


Fig. 359. Dreiphasen-Generator Brown, Boveri & Cie., kompondiert, Spannungskurve abhängig von der Belastung.

Trotz ihrer größeren Komplikation dürften diese Heylandschen Motorgeneratoren einen großen Fortschritt auf dem Gebiete der Wechselstromtechnik bedeuten.

26. Kapitel.

Messung von Wechselspannungen.

1. Spannungsmessungen von Wechselströmen mit dem Quadrantelektrometer.

Für Präzisionsmessungen von Wechselstromspannungen eignen sich nur das Quadrantelektrometer und das Elektrodynamometer.

Das Prinzip, das bei der Einrichtung des

Quadrantelektrometers

zur Anwendung kommt, sowie das Verfahren bei der Messung von Wechselspannung mit diesem Instrumente ist schon in den Grundzügen der Gleichstromtechnik, Kap. XI, 1., S. 200, auseinandergesetzt worden.

Man mißt bei der früher (Gleichstromtechnik S. 202 unter c) beschriebenen Methode die effektive Spannung.

Die Notwendigkeit, bei der Messung für sorgfältige Isolation aller Teile, zumal der Zu- und Ableitungen besorgt zu sein, macht die Anwendung besonderer Vorrichtungen, sogenannter Elektrometerschlüssel, erforderlich, durch die man rasch hintereinander die Zuleitungen des Instrumentes das eine Mal an die Punkte P' P'' legen kann, deren Potentialdifferenz gemessen werden soll, und dann an die Pole eines Normalelementes, ohne daß man dabei genötigt wird, eine der Leitungen selbst zu berühren.

Auch für die technische Praxis hat man unter Benutzung derselben Grundsätze besonders für die Messung hoher Wechselspannungen elektrostatische Voltmeter konstruiert. Wir haben schon früher¹⁾ derartige Einrichtungen beschrieben.

Da bei unmittelbarer Messung sehr hoher Spannungen das Überspringen von Funken von den beweglichen auf die ruhenden Teile der elektrostatischen Voltmeter befürchtet werden muß, schließt man für Meßzwecke die hohe Spannung an eine Reihe hintereinander geschalteter Kondensatoren an, und zweigt von den Belegen eines der Kondensatoren Meßleitungen nach den Klemmen des Voltmeters ab.

¹⁾ Grundzüge der Gleichstromtechnik, Kap. XI, 11., S. 226.

2. Das astatische Elektrodynamometer von Siemens & Halske.

Ähnlich wie man bei Gleichstrom für genaue Spannungsmessungen das Torsionsgalvanometer verwendet,¹⁾ benutzt man bei Wechselströmen das Elektrodynamometer, dessen Einrichtung auch mit der des Torsionsgalvanometers gewisse Ähnlichkeit hat. Bei diesem Instrumente wird der elektrodynamischen Anziehung zweier von demselben Strom durchflossenen Spulen durch die elastische Gegenkraft einer Torsionsfeder das Gleichgewicht gehalten und durch den Torsionswinkel die Größe der Kraft gemessen.

Die Fig. 360 stellt das Instrument dar.

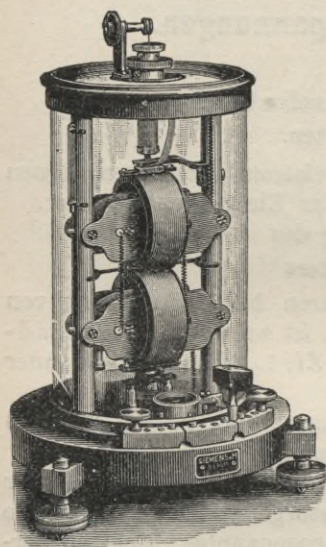


Fig. 360. Astatisches Elektrodynamometer von Siemens & Halske.

Ein Paar zylindrisch geformter beweglicher Spulen umschließt zwei ovale feste Spulen, sodaß die Windungsebenen beider Spulensysteme zueinander senkrecht stehen. Die beiden festen Spulen sind übereinander zwischen zwei Messingssäulen angeordnet, die in eine mit drei Fußschrauben und einer Dosenlibelle versehene Hartgummiplatte eingesetzt sind. Die beiden Säulen endigen oben in einem horizontalen Messingring. Auf diesen Ring ist eine Spiegelglasplatte fest aufgelegt, die an ihrem Umfange eine eingezogene Kreisteilung und in der Mitte eine Aufhängevorrichtung für das bewegliche Spulenpaar trägt. Die beiden untereinander fest verbundenen beweglichen

Spulen sind an einem dünnen Metalldraht aufgehängt. Durch zwei oben und unten angebrachte schwache Spiralfedern wird der Strom in die Wicklungen der beweglichen Spulen geleitet. Die Quecksilbernapfchen, in die bei dem Elektrodynamometer für starke Ströme die Enden der beweglichen Spule eintauchen (vergl. Grundzüge, Kap. VII, 2., S. 157), sind hier durch achsial stehende Spiralfedern ersetzt.

Die obere dieser beiden Federn, die zugleich als Torsionsfeder zur Messung der ablenkenden Kraft des Stromes dient, ist an einen Torsionsknopf angeschlossen, der sich in einem in der oberen Glasplatte befestigten Messingringe dreht. Der Torsionsknopf besteht aus zwei ineinander gesteckten Messingzylindern, deren jeder oben in eine geränderte Scheibe ausläuft. Durch eine am äußeren Zylinder

¹⁾ Vergl. Grundzüge der Gleichstromtechnik, Kap. X, 2., S. 188.

angebrachte kleine Druckschraube ist der innere Zylinder in dem äußeren festgeklemmt. Unten am inneren Zylinder ist, von ihm durch Hartgummi isoliert, eine Messingscheibe befestigt; an diese ist die stromführende Torsionsfeder angeklemt. Die Stromzuleitung übernimmt eine gegen den Umfang der Scheibe schleifende Bürste, die von einer der senkrechten Messingsäulen gehalten wird. Der Metallfaden, an dem die beweglichen Spulen hängen, ist durch die Achse des Torsionsknopfes isoliert hindurchgeführt und um einen Wirbel gewickelt. Auf diese Weise ist der Torsionsknopf von den stromführenden Teilen sorgfältig isoliert, sodaß das Instrument ohne Gefahr auch für hohe Spannungen verwendet werden kann. Der äußere Zylinder des Torsionsknopfes trägt ferner einen dicht oberhalb der Glasteilung liegenden Zeiger. Ein zweiter Zeiger, dessen Spitze jedoch unter der Glasteilung spielt, ist wie beim Torsionsgalvanometer (Gleichstromtechnik, Kap. VI, 13., S. 148) an dem beweglichen Spulensystem befestigt; zwei Messingarme, die von dem mittleren Verbindungsstück beider beweglichen Spulen ausgehen und gegen die beiden senkrechten Säulen anschlagen, schränken den Ausschlag des Zeigers auf einen kleinen Winkel ein.

Durch eine auf der Grundplatte angebrachte Arretierungsschraube, die auf einen Winkelhebel wirkt, kann das bewegliche Spulensystem gehoben, gegen einen von einer der Säulen ausgehenden Arm angedrückt und dadurch festgeklemmt werden, sodaß der Aufhängefaden und die Spiralfedern beim Transport des Instrumentes nicht beschädigt werden können.

Die Windungen sämtlicher Spulen sind hintereinander geschaltet; die Stromrichtung und die Windungszahlen der beiden beweglichen Spulen sind so gewählt, daß die magnetischen Wirkungen der beiden übereinander liegenden Spulen genau gleich und entgegengesetzt gerichtet sind. Die beiden Spulen bilden daher ein astatisches System, auf das äußere Magnetfelder im allgemeinen keine ablenkende Wirkung ausüben können.

Vorn auf der Grundplatte befinden sich drei Messingklötze. Die beiden äußeren Klötze tragen die Anschlußklemmen des Apparates, zwischen dem mittleren und linken Klotze liegt die Elektrodynamometerwicklung, zwischen dem mittleren und rechten Klotze ist ein unterhalb der Grundplatte angebrachter Vorschaltwiderstand eingeschaltet, der durch Einsetzen eines Stöpsels zwischen beide Klötze kurzgeschlossen werden kann. Durch Kurzschließen dieses Vorschaltwiderstandes wird der Widerstand des Instrumentes auf die Hälfte herabgesetzt, der Ausschlag daher auf das Doppelte erhöht.

Das astatische Elektrodynamometer wird für Meßbereiche von 15 bis 90 Volt oder 30 bis 180 Volt oder 120 bis 720 Volt geliefert.

Durch Vorschalten eines induktionsfreien Widerstandes kann der Meßbereich des Instrumentes bis auf 3240 Volt erweitert werden.

Beim Gebrauch stellt man das Elektrodynamometer auf einen möglichst festen Tisch und bringt durch Verstellen der Fußschrauben die Dosenlibelle zum Einspielen. Dann löst man die Arretierungsschraube, bis das bewegliche Spulenpaar frei schwebt, und dreht den Torsionsknopf, sodaß der Torsionszeiger über dem Nullpunkt der Skala liegt. Dann spielt auch der mit den beweglichen Rollen verbundene Zeiger auf null ein.

Vor Ausführung der Messung entfernt man den Stöpsel aus dem Schaltapparat, damit das Instrument zunächst eine geringe Empfindlichkeit besitzt, und verbindet darauf die Anschlußklemmen des Elektrodynamometers durch gut isolierte Drähte mit den beiden Punkten, deren Spannungsunterschied gemessen werden soll. Der durch die Spulen des Instrumentes fließende Strom, der der Klemmenspannung proportional ist, erteilt dem Zeiger des beweglichen Spulenpaares eine Ablenkung entgegengesetzt der Drehung des Uhrzeigers. Durch Rechtsdrehen des Torsionsknopfes bringt man den beweglichen Zeiger auf den Nullpunkt der Skala zurück. Der Torsionswinkel α , um den der Zeiger des Torsionsknopfes hierbei gedreht werden muß, dient als Maß für den gesuchten Spannungsbetrag. Die Skala ist derart geteilt, daß an ihr direkt die Quadratwurzeln aus den Ablenkungen abgelesen werden können. Es ist daher die abgelesene Ziffer nur noch mit einer Konstanten zu multiplizieren, um sofort den Wert der Spannung zu erhalten. Ist die Ablenkung des Torsionszeigers zu klein, um eine genaue Ablesung zu erlauben, so setzt man den Stöpsel zwischen den mittleren und rechten Schaltklotz ein und erhält dadurch die doppelte Empfindlichkeit des Instrumentes. Es empfiehlt sich, die Messung schnell vorzunehmen, damit keine beträchtliche Erwärmung der Drahtwicklung eintreten kann; sonst würde der Widerstand der Spulen sich ändern und kleine Fehler der Messung hervorrufen.

Neuerdings werden zur Bewickelung ähnlicher Meßinstrumente und zumal für die Vorschaltwiderstände meist Drähte verwendet, deren Temperaturkoeffizienten gleich null sind (Manganin, Konstantan); oder man wählt zu einer Bewickelung aus Draht mit nur positivem Temperaturkoeffizienten einen Vorschaltwiderstand von Draht mit negativem Temperaturkoeffizienten, sodaß die Widerstandsänderungen für alle gangbaren Temperaturverhältnisse sich kompensieren.

Durch die pendelnden Schwingungen des beweglichen Spulensystems wird es oft erschwert den Torsionszeiger so einzustellen, daß der bewegliche Zeiger genau und ruhig auf dem Nullpunkt steht; man kann jedoch diese störenden Schwingungen sehr schnell ab-

dämpfen, wenn man den Torsionsknopf im Takte der Pendelschwingungen, der jedesmaligen Bewegungsrichtung des beweglichen Zeigers entgegen, um einen sehr kleinen Winkel hin und her dreht.

Verwendet man das Elektrodynamometer zur Messung der Spannung an einem Wechselstromkreise oder an einem Zweige eines Drehstromkreises, so ist der durch das Instrument fließende Strom i :

$$i = \frac{E}{\sqrt{w^2 + 4\pi^2 \sim^2 L^2}} \dots \dots \dots 1)$$

wenn w der Ohmsche Widerstand, \sim die Periodenzahl des Wechselstromes und L der Selbstinduktionskoeffizient des Instrumentes ist. Die gesuchte effektive Spannung des Stromkreises ist alsdann:

$$E = C \cdot w \cdot \sqrt{1 + \frac{4\pi^2 \sim^2 L^2}{w^2}} \dots \dots \dots 2)$$

C ist eine Konstante.

$$E = K \cdot \sqrt{a} \cdot F \dots \dots \dots 3)$$

wenn $C \cdot w = K$ gesetzt und mit F ein von der Periodenzahl abhängiger Korrektionsfaktor

$$F = \sqrt{1 + \frac{4\pi^2 \sim^2 L^2}{w^2}} \dots \dots \dots 4)$$

bezeichnet wird. Dieser Korrektionsfaktor F kann fast immer unberücksichtigt bleiben, da das Elektrodynamometer so konstruiert ist, daß sein Induktionskoeffizient L sehr klein gegen seinen Widerstand w ist. Für nicht zu große Werte der Periodenzahl \sim weicht der Wert des Korrektionsfaktors F nur sehr wenig von 1 ab. Nur wenn eine sehr große Genauigkeit der Messung verlangt wird, oder wenn man mit Strömen von hoher Wechselzahl arbeitet, wird man den Korrektionsfaktor mit Hilfe der in der Aichungstabelle des Instrumentes angegebenen Werte von L , und w für den bekannten Wert von \sim berechnen.

3. Präzisions-Spannungsmesser für Wechselströme.

Nach Art der früher beschriebenen Präzisionswattmeter (Gleichstromtechnik Kap. XII, 4., S. 230) sind auf rein dynamometrischem Prinzip schon früher von Weston und neuerdings (1900) von Siemens & Halske, A.-G., Präzisionsinstrumente für Wechselstrommessungen konstruiert worden. Diese Apparate haben eine feststehende und eine bewegliche Spule.

Bei dem Wechselstromspannungsmesser von Weston (Fig. 361), der im übrigen dem früher (Gleichstromtechnik Kap. XI, 4., S. 206) beschriebenen Instrumente gleicht, wird das magnetische Feld durch eine unbewegliche feste Spule erzeugt. Eisenteile kommen in diesen Apparaten überhaupt nicht vor. Im Prinzip stimmt somit die Ein-

richtung ganz mit der des Elektrodynamometers überein. Die Anordnung der festen und der beweglichen Spule nebst Zeiger, sowie die Einrichtung der Bremse, durch die beim Transport die bewegliche Spule festgehalten wird, sind aus untenstehender Abbildung Fig. 361 zu erkennen.

Unter dem Deckel befindet sich ein kleiner Rheostat, dessen Widerstand durch drehen des oben rechts (Fig. 361) gezeichneten Knopfes verändert werden kann. Man stellt den Zeiger, den dieser Knopf trägt, auf die Zahl ein, welche das in das Instrument eingebaute Thermometer anzeigt. Dieser Widerstand ist vor die Feldwicklung geschaltet und korrigiert das Instrument gegen Temperaturfehler.

An der Achse des beweglichen Spulensystems sind unten Aluminiumflügel befestigt, die sich in einer Kammer bewegen und eine so vorzügliche Luftdämpfung ergeben, daß das Instrument nahezu völlig aperiodisch ist.

Die erforderlichen Vorschaltwiderstände befinden sich für Spannungen bis 150 Volt im Kasten, für höhere Spannungen im Deckel des Apparates.

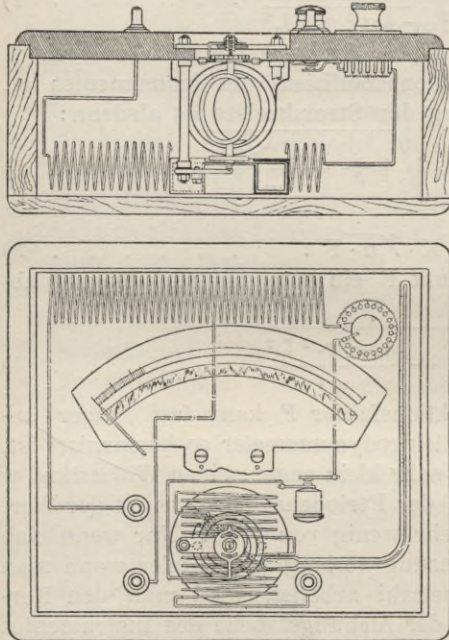


Fig. 361. Präzisions-Spannungsmesser der European Weston Electrical Instrument Co. in Berlin. (Schematische Darstellung.)

Gegen äußere magnetische Einflüsse ist das Wechselstromvoltmeter empfindlich.

Bei dem Präzisionsspannungsmesser von Siemens & Halske, A.-G., ist die bewegliche Spule um eine in Spitzen gelagerte Achse drehbar. Durch elastische Federn, die gleichzeitig zur Stromzu- und Abführung dienen, erhalten sie Richtkraft. Als Dämpfung dient die früher (Gleichstromtechnik Kap. XII, 4., S. 231) besprochene Luftdämpfung.

Die Skalen solcher Instrumente sind nicht gleichmäßig und müssen empirisch hergestellt werden. Fig. 362 zeigt z. B. die Skala eines solchen Spannungsmessers für 0 bis 150 Volt.

Der Selbstinduktionskoeffizient solcher Meßinstrumente ist nicht konstant, er setzt sich zusammen aus den Selbstinduktionskoeffizienten

der festen und der beweglichen Spule und dem doppelten Koeffizienten der gegenseitigen Induktionen beider Spulen. Letzterer ist null, wenn die Spulen senkrecht zueinander stehen, in der Nulllage ist er negativ, beim Endausschlag positiv. Die Selbstinduktion des ganzen Systems ist aber im Vergleich zum Widerstand (800Ω) so klein, (0,038 Henry an dem einen, 0,054 am anderen Ende der Skala), daß ihr Einfluß vernachlässigt werden kann. Der Einfluß der Periodenzahl hängt ab von dem scheinbaren Widerstand, der Impedanz der beweglichen



Spule $\sqrt{w^2 + (2\pi \sim L)^2}$. Macht man nun den Widerstand w sehr groß und L klein, so ist der Einfluß des zweiten Gliedes, welches

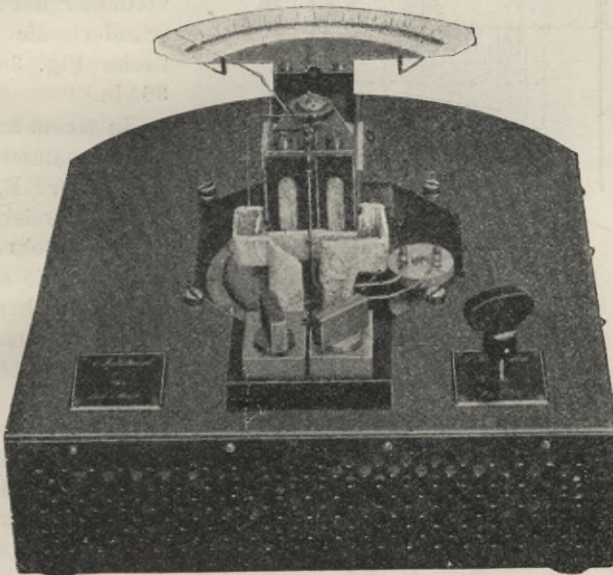


Fig. 363. Neuer Präzisionsspannungszeiger von Siemens & Halske.

die Periodenzahl \sim und den Selbstinduktionskoeffizienten L enthält, verschwindend. Für den Vorschaltwiderstand wird Manganindraht verwendet, sodaß der Widerstand von der Temperatur unabhängig wird. Fig. 363 zeigt die Einrichtung des Instrumentes nach Abnahme des Schutzkastens.

Derartige Apparate sind leicht transportabel und werden vorzugsweise verwendet, um Schaltbrettinstrumente damit von Zeit zu Zeit nachzuprüfen.

4. Präzisionsvoltmeter der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft.

Auch diese Apparate beruhen auf dem Principe des Elektrodynamometers, ihr Vorzug ist eine besonders große Dämpfung. Die

Unabhängigkeit von der Periodenzahl und von der Temperatur ist ebenfalls durch große induktionsfreie Vorschaltwiderstände aus Drähten ohne Temperaturkoeffizient erreicht.

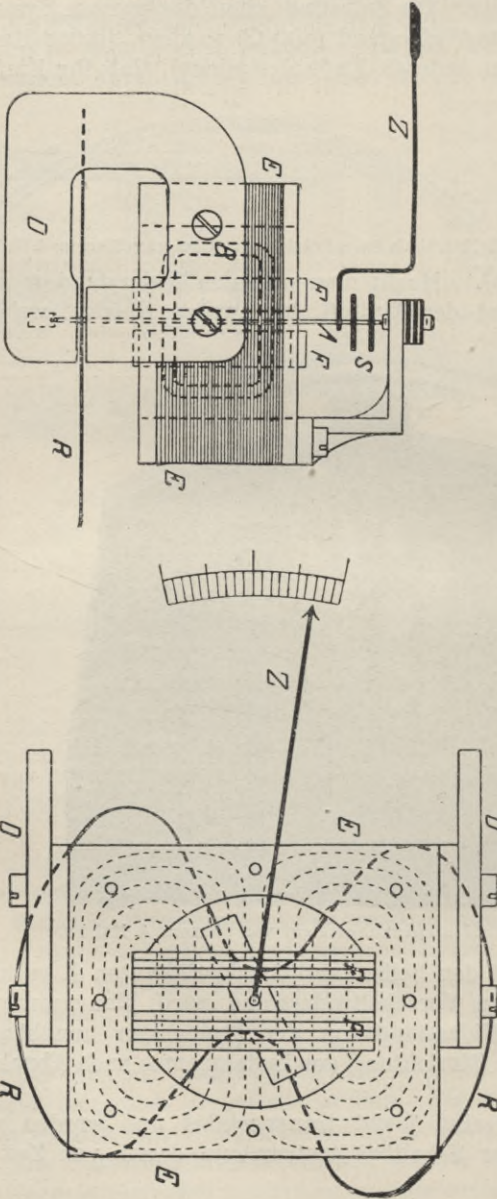
Die prinzipielle Einrichtung der Präzisionsvoltmeter der A. E.-G. erläutert die schematische Fig. 364 a und 364 b.

In einem aus Eisenblech zusammengesetzten Körper *EE*, welcher eine von Kreisbögen begrenzte Bohrung besitzt, ist die aus zwei Teilen bestehende feste Spule *FF* eingesetzt. Innerhalb dieser Spule befindet sich an der Achse *A* die bewegliche Spule *B*. Der Spule *B* wird der Strom durch die Spiralfedern *S*, die gleichzeitig als Richtkraft und Gegenkraft dienen, zugeführt. Auf der Achse *A* sitzt oben der Zeiger *Z*, welcher auf einer empirisch geachteten Skala einspielt, und unten der Aluminium-Doppelflügel *R*, dessen äußerer Rand sich

Fig. 364a.

Einrichtung des Präzisionsvoltmeters der A. E.-G.

Fig. 364b.



zwischen den Polen der beiden Dämpfungsmagnete D bewegt und in bekannter Weise dazu dient, die Schwingungen des drehbaren Systems zu dämpfen. Die gestrichelten Linien in der Fig. 364 b stellen den Verlauf der von der festen Spule erzeugten Kraftlinien dar. Der Eisenkörper E ist so gestaltet, daß er die Kraftlinien der festen Spule in sich aufnimmt und ihren Verlauf so bestimmt, daß die Dämpfungsmagnete D von ihnen nicht getroffen werden und infolgedessen ihren

Dauermagnetismus nicht verlieren. Der innere Teil des Instrumentes hingegen, in welchem sich die drehbare Spule bewegt, ist frei von Eisen. Es ist also gewissermaßen nur der Rückweg der Kraftlinien durch Eisen geschlossen, was für die elektrischen Eigenschaften dieser Instrumente von Wichtigkeit ist.

Die äußere Erscheinung eines solchen für zwei Meßbereiche bestimmten Instrumentes zeigt Fig. 365.

Bei einem Instrument für 125 Volt betragen die Widerstände der festen und beweglichen Spule zusammen 130Ω , der Vorschaltwiderstand 2000Ω . Der Strom ist somit höchstens $0,06$ Ampère stark und der Gesamtverlust beträgt $7,5$ Watt.

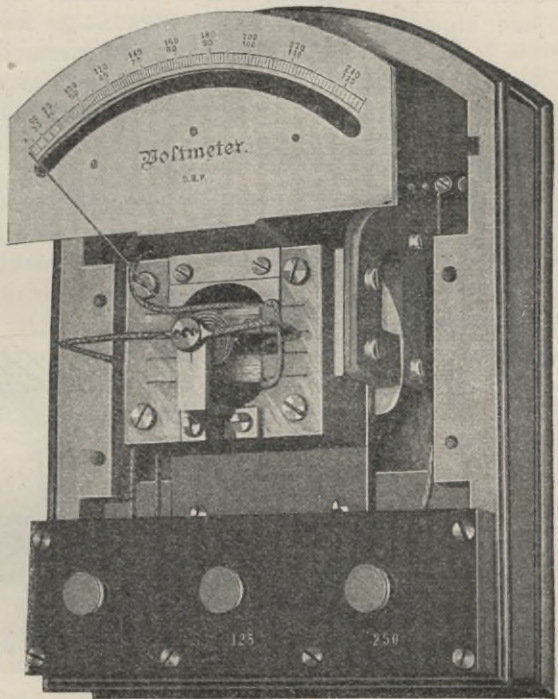


Fig. 365. Präzisionsvoltmeter der A. E.-G.,

5. Älterer Spannungszeiger von Siemens & Halske, A.-G.

Dieser ausschließlich als Schaltbrettinstrument verwendete Spannungszeiger besteht aus einer mit Kupferdraht gewickelten Spule, die als aus drei übereinander befindlichen Spulen von gleichem inneren Durchmesser zusammengesetzt betrachtet werden kann, von denen die oberste den kleinsten, die unterste aber den größten äußeren

Durchmesser besitzt. Über der Spule schweben, teilweise in diese hineinragend, nahe der Wandung ein oder zwei Eisenstäbchen a (vergl. Fig. 366)¹⁾. Diese hängen an einem dünnen, in einer Öse b endigenden Drahte c, die durch ein kleines Loch am Ende eines Hebelarmes geführt ist, der auf einer den Zeiger tragenden Achse d angebracht ist. Tritt an den Instrumentenklemmen eine Spannungsdifferenz auf, durchfließt also die Spulen ein Strom, so wird das Eisenstäbchen, je nach der Stärke desselben, mehr oder weniger tief in jene hineingezogen, und die geradlinige Bewegung des Eisenstäbchens bewirkt eine drehende Bewegung des Zeigers, deren Größe ein Maß für die an den Klemmen des Instrumentes herrschende Spannung bildet. Der Zeiger f ist fest mit dem Rahmen und der Achse verbunden und stellt sich, solange kein Strom durch

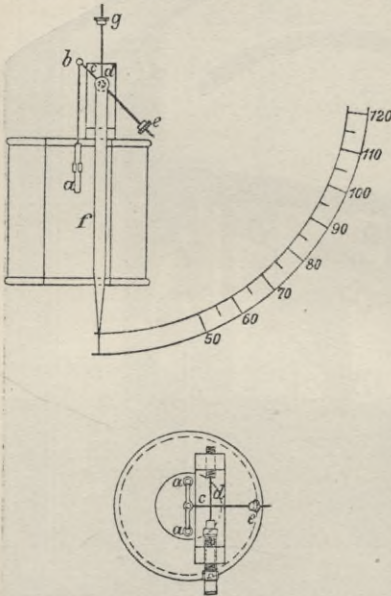


Fig. 366. Schematische Darstellung des Wechselstrom-Spannungszeigers von Siemens & Halske.

die Spule fließt, vertikal. Um die Empfindlichkeit nach Bedarf ändern zu können, ist in der Verlängerung des Zeigers noch ein Stäbchen angebracht, auf dem ein Laufgewicht g verschoben werden kann.

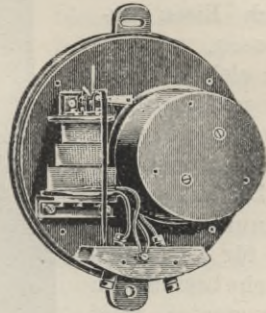


Fig. 367. Spannungszeiger von Siemens & Halske.

Um einerseits dem Instrumente als Spannungszeiger den nötigen Widerstand zu verleihen und andererseits seine Angaben von den durch die Stromwärme und die Schwankungen der äußeren Temperatur hervorgerufenen Änderungen seines Widerstandes unabhängig zu machen, liegt zwischen den Instrumentenklemmen noch in Hintereinanderschaltung mit der Kupferspule eine mit Manganindraht bifilar

¹⁾ Vergl. Kap. 8, 6., S. 113.

bewickelte Rolle in einem im Sockel des Spannungszeigers angebrachten Gehäuse, die den fünffachen Widerstand der zu ihr gehörigen Kupferspule besitzt. (Vergl. Fig. 367.)

Die Spannungszeiger für mehr als 300 Volt erhalten, da es nicht möglich ist den ganzen von ihnen benötigten Vorschaltwiderstand im Instrumente selbst unterzubringen, einen besonders gefertigten Zusatzwiderstand, der einen Teil des Manganindrahtes des Vorschaltwiderstandes enthält.

6. Andere Spannungsmeßinstrumente.

In der Wechselstrompraxis werden für niedere und mittlere Spannungen fast ausschließlich die schon an anderem Orte (Gleichstromtechnik Kap. XI, 5., S. 212) beschriebenen Hitzdrahtspannungsmesser verwendet. Bei Wechselstrominstrumenten aber müssen die Vorschaltwiderstände selbstverständlich induktionsfrei sein. Diese Apparate haben den großen Vorteil, daß sie von Periodenzahl und Kurvenform des Wechselstromes völlig unabhängig sind.

Das eingeschaltete Instrument verbraucht wenig mehr als 1 Watt, und der mittlere Fehler bei dauernder Einschaltung erreicht nicht ganz 1%. Gegen in der Nähe vertikal verlaufende stromführende Drähte ist das Instrument ziemlich unempfindlich, weil deren Kraftlinien horizontal verlaufen.

Horizontale, stärkere Ströme führende Drähte dürfen nicht in nächster Nähe des Apparates vorübergeleitet werden, und das wird ein geschickter Monteur immer vermeiden können.

7. Wechselstrom-Induktionsvoltmeter der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft.

Diese Instrumente beruhen auf der elektro-dynamischen Schirmwirkung und haben folgende Anordnung:

Zu beiden Seiten einer um die Achse A drehbaren Metallscheibe (Fig. 368) befinden sich die Wechselstrom-Magnetspulen M einander gegenüber. Vor diesen befinden sich die Aluminiumplatten (Schirme) T, welche die Polflächen teilweise bedecken. Die Kraftlinien, die von einem Magnetpol zum andern übergehen, treffen zum Teil die feststehenden Schirme, zum Teil (links von den Schirmen) die drehbare Scheibe und induzieren in ihnen in sich geschlossene Ströme. Da diese Ströme von demselben magnetischen Felde erzeugt werden, haben sie dieselbe Richtung. Nach einem Grundgesetze der Elektrodynamik ziehen sich nun gleichgerichtete parallele Ströme an und weil die in der drehbaren Scheibe induzierten Ströme links seitwärts von dem Schirm (neben dem unbedeckten Teile der Magnetpole) ihren Sitz haben, so erhält die Scheibe ein Drehmoment im Sinne des Pfeiles.

¹⁾ Vergl. Kap. 10, 4., S. 124.

Eine elastische Feder oder das Drehmoment eines Gewichtes hält dem elektrodynamischen Drehmoment das Gleichgewicht. In der praktischen Ausführung haben die schirmenden Platten ein anderes Aussehen; sie reichen nach rechts nicht über die drehbare Scheibe hinaus, sondern sind aufgebogen, sodaß sie oben und rechts den Pol auch seitlich bedecken. Außerdem wirkt auf die Scheibe noch der in der Fig. 369 a sichtbare Dauermagnet, um eine gute Dämpfung hervorzubringen. Fig. 369 a zeigt das innere und Fig. 369 b das äußere Aussehen der Volt- und Amperemeter. Der Hauptvorteil dieser Instrumente ist der, daß sie

eine sehr gute Dämpfung haben. Ein anderer Vorzug liegt darin, daß ihre Angaben weniger von der Kurvenform des Wechselstromes abhängig sind als die von Instrumenten, die auf der Anziehung

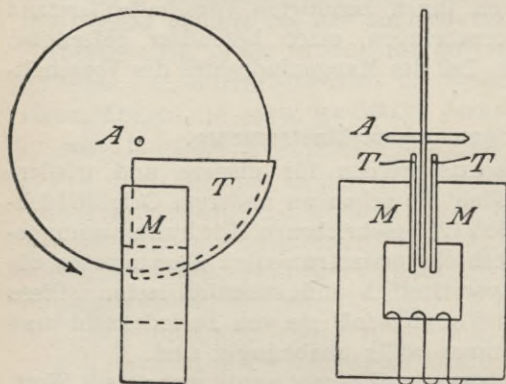


Fig. 368. Wechselstrom-Induktionsvoltmeter der A. E.-G.

in der Fig. 369 a sichtbare Dauermagnet, um eine gute Dämpfung hervorzubringen. Fig. 369 a zeigt das innere und Fig. 369 b das äußere Aussehen der Volt- und Amperemeter. Der Hauptvorteil dieser Instrumente ist der, daß sie

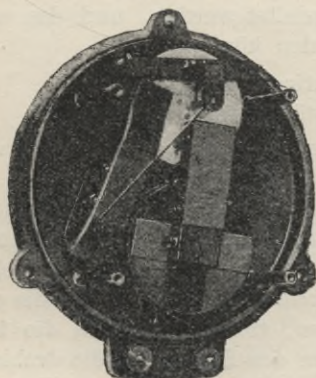


Fig. 369 a.
Wechselstrom-Induktionsvoltmeter der A. E.-G.



Fig. 369 b.

eines irgendwie geformten Eisenkörpers von dem magnetischen Felde einer Stromspule beruhen. Es ist ein Nachteil dieser Instrumente, daß ihre Angaben von der Periodenzahl abhängen. Für gewöhnlich werden sie für Spannungen bis 1000 Volt angefertigt; für höhere Spannungen ist der Anschluß an einen Meßtransformator vorzuziehen.

8. Meßschaltung für Hochspannungsanlagen der E.-A.-G. vorm. W. Lahmeyer & Co. in Frankfurt a. M.¹⁾

Die Messung hoher Betriebsspannungen, die mehrere 1000 Volt betragen, ist schwierig und schließt gewisse Gefahren in sich. Statische Voltmeter zeigen selten genau genug und sind sehr empfindlich gegen Stöße. Hitzdrahtvoltmeter erfordern außerordentliche große

Vorschaltwiderstände. Meßtransformatoren, durch die hohe Spannungen auf ungefährliche Höhe reduziert werden, fallen teuer aus, beanspruchen viel Raum, der hinter den Schaltbrettern meist knapp ist, und schließen die Gefahr eines Durchschlagens und des Eindringens hoher Spannung in die Meßanlage nicht aus.

Die E. A.-G. vorm. W. Lahmeyer & Co. verwendet in allen Meßinstrumenten und auch in den Phasenlampen nur Niederspannung. Jede leitende Verbindung mit der Hochspannung ist ausgeschlossen.

Zu diesem Zwecke stehen einige Ankerwindungen oder eine Ankerspule der Hochspannungsmaschine gar nicht mit den übrigen Windungen in Verbindung; sie sind vielmehr an einen Transformator mit dem Umsetzungsverhältnis 1 : 1 angeschlossen, dessen sekundäre Wickelung zu den übrigen Ankerwickelungen in Serie geschaltet wird.

Fig. 370 zeigt diese Anordnung beispielsweise für eine einphasige Wechselstrommaschine. T ist der Transformator, W das Wattmeter, A das Amperemeter, V das Voltmeter.

Es wird dadurch gleichzeitig der Vorteil erreicht, daß die beiden Spulen, zwischen welchen die größte Spannungsdifferenz besteht, durch die Meßspule getrennt sind.

Liefert eine Ankerspule noch immer zu hohe Spannungen, so wird nur ein Teil ihrer Windungen benutzt und diese werden sorgfältig von den übrigen isoliert (vergl. Fig. 371).

Fig. 372 zeigt schematisch die Schaltung für zwei einphasige Wechselstrommaschinen. Wie ersichtlich, gelangt der Strom sämt-

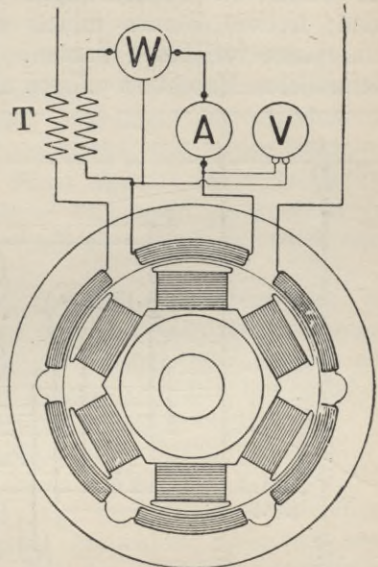


Fig. 370. Meßschaltung für Hochspannungsanlagen.

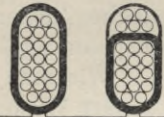


Fig. 371. Meßschaltung für Hochspannungsanlagen.

¹⁾ D. R.-P. 106517, vergl. auch ETZ 1899, Heft 50 und dieses Buch, S. 566.

licher Meßspulen zur Sammelschiene I. Von hier aus durchfließt er das Hauptwattmeter, das Hauptampèremeter, sowie den (nicht dargestellten) Hauptzähler und gelangt dann in die Schiene II, von der er durch die Maschinen-Ampèremeter zu den einzelnen Hilfstransformatoren und dann in die Meßspule zurückgelangt. Der andere Pol sämtlicher Meßspulen steht mit der Schiene III in Verbindung, an welche die Phasenlampen (vergl. Kap. 32, 6.) angeschlossen sind; letztere können mittels eines Umschalters mit den einzelnen Maschinen verbunden werden. Die Meßspulen der nicht in Betrieb befindlichen Maschinen müssen natürlich von der Schiene III getrennt

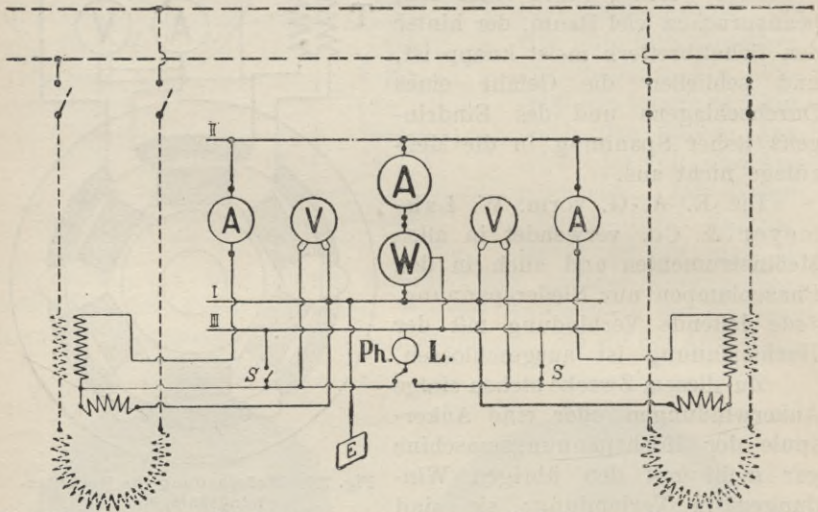


Fig. 372. Meßschaltung für Hochspannungsanlagen der E.-A.-G. vorm. W. Lahmeyer & Co. werden. Hierzu dient der kleine Hilfsschalter S, der mit dem Hauptschalter der Maschine mechanisch gekuppelt ist. In Fig. 372 sind sämtliche Niederspannungsleitungen voll ausgezogen, während die Hochspannung führenden Leitungen und Sammelschienen punktiert sind. Wie man sieht, durchfließt der Hochspannungsstrom nur die sekundäre Wickelung des Hilfstransformators und gelangt dann direkt zum Ausschalter und zu den Hochspannungsschienen. Letztere können z. B. im Keller des Maschinenhauses untergebracht werden, sodaß die Schalttafel von allen Hochspannung führenden Teilen frei ist. Die Hochspannung wird überhaupt gar nicht in das Maschinenhaus geführt; sie gelangt vielmehr direkt zu den gleichfalls im Keller mündenden Verteilungskabeln. Um ohne jede Gefahr an der Schalttafel hantieren zu können, wird noch die Vorsichtsmaßregel getroffen, daß die Meßschaltung geerdet ist.

27. Kapitel.

Messung der Stärke von Wechselströmen.

1. Messung der Stromstärken von Wechselströmen.

Obgleich wir schon in den Grundzügen der Gleichstromtechnik (Kap. VII, 2., S. 151) das wichtigste Instrument für die Messung von Wechselströmen, das Elektrodynamometer, und seinen Gebrauch ausführlich beschrieben haben und dieser Apparat für viele Bedürfnisse des Fachmannes genügt, so ist er doch nicht geeignet, in der Praxis als Stromzeiger für die eine Wechselstromanlage bedienenden Arbeiter verwendet zu werden.

Für solche Zwecke benutzt man gewöhnliche Ampèremeter, die eine Spule besitzen, die nur aus einer oder ganz wenigen Windungen besteht, und in deren Felde sich ein ganz kleiner oder ein aus einzelnen voneinander isolierten dünnen Blechen oder Drähten bestehender Eisenkörper mit kurzer magnetischer Achse bewegt.

Die Hummelschen Ampèremeter (Gleichstromtechnik Kap. X, 4 a, S. 193), der Strommesser von Hartmann & Braun (a. a. O., S. 194), das Ampèremeter von Siemens & Halske (a. a. O., S. 195) erfüllen diese Bedingungen und sind sehr wohl brauchbar, wenn sie nach einem Elektrodynamometer oder einem anderen Präzisionsinstrument mit einem Wechselstrom von derselben Periodenzahl und der gleichen Form der Stromkurve geeicht worden sind.

Für viele Zwecke kann man auch Hitzdrahtampèremeter verwenden, deren eigentlicher Meßapparat entweder selbst von dem zu messenden Strome durchflossen wird oder zu einem induktionsfreien Widerstande von passender Größe im Nebenschlusse liegt (vergl. Gleichstromtechnik Kap. XI, 5., S. 212).

Zu genauen Messungen, z. B. zur Aichung von Schaltbrettinstrumenten, kann auch die elektrodynamische Stromwaage von W. Thomson (Lord Kelvin) verwendet werden (vergl. Gleichstromtechnik Kap. VII, 3., S. 160).

2. Stromzeiger von Siemens & Halske.

Die für Gleich-, Wechsel- und Drehstrom bestimmten Schaltbrett-Stromzeiger der Firma Siemens & Halske werden für niedere Stromstärken, bis 50 Ampère, so gebaut, wie die S. 470 beschriebenen Spannungszeiger. Jedoch besteht die Spule nicht aus drei übereinander ge-

lagerten Teilen von gleichen inneren, aber verschiedenen großen äußeren Durchmessern, sondern die Spule bildet einen einzigen Hohlzylinder von durchweg gleichmäßigem äußeren Radius. Ebenso fällt bei dem Stromzeiger der mit Manganindraht gewickelte Vorschaltwiderstand fort, und ferner werden die Anschlußklemmen resp. Anschlußstücke anders wie beim Spannungszeiger, entsprechend der maximalen Stromstärke, für die das Instrument bestimmt ist, dimensioniert. Mit dem bei den Spannungszeigern der obigen Firma zur Verwendung gelangenden System mit einem Eisenstäbchen, Öse und einer Achse werden nur die Stromzeiger für Stromstärken bis 50 Ampère versehen; die für höhere Stromstärken gebauten erhalten ein System mit zwei Eisenstäbchen, das statt der beiden Ösen eine zweite Achse besitzt.

(Vergl. Fig. 373.)

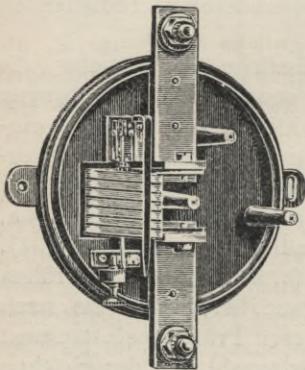


Fig. 373. Stromzeiger von Siemens & Halske.

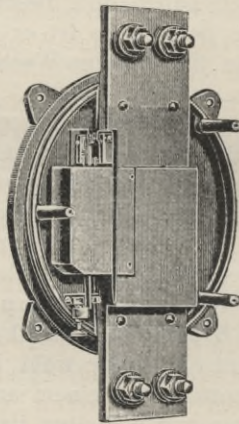


Fig. 374. Stromzeiger für sehr starke Ströme von Siemens & Halske.

Die Spulen der Stromzeiger für Ströme bis 50 Ampère werden aus besponnenem Kupferdraht hergestellt. Für Ströme von 50 bis 300 Ampère gelangen aus blankem Flachkupferband gefertigte Spulen zur Anwendung oder Kupferspulen, deren Windungen durch geeignetes Ausfräsen massiver

Kupferzylinder erhalten worden sind. Für noch höhere Stromstärken benutzt man Spulen, die nur eine einzige Windung besitzen, die, wie die Fig. 374 zeigt, nicht mehr zylindrische Form haben, sondern aus Flachkupfer zusammengebaut werden und dann das Aussehen eines flachen Kastens haben.

Den Stromzeigern für Ströme bis höchstens 50 Ampère werden, wie dem Spannungszeiger, nebeneinander am unteren Teile des Sockels befindliche Anschlußklemmen gegeben, während die Instrumente für höhere Stromstärken als 50 Ampère Anschlußstücke aus Flachkupfer erhalten, die oben und unten am Sockel befestigt sind, und deren Querschnitt der maximalen Stromstärke, für die der Apparat bestimmt ist, entspricht.

Da die Wirkung der Strom- und Spannungszeiger von der Firma Siemens & Halske auf der anziehenden Kraft beruht, die eine

Spule auf ein oder zwei über ihr aufgehängte Eisenstäbchen ausübt, und Angaben derartiger Instrumente nicht nur für Gleich- und Wechselstrom verschieden sind, sondern bei Wechselstrom auch je nach der Periodenzahl und der Gestalt der Stromkurve anders ausfallen, so muß ihre Eichung mit der Stromart erfolgen, für die sie bestimmt sind, also für Gleichstrom mit Gleichstrom und für Wechsel- und Drehstrom mit Wechselstrom und zwar mit Wechselstrom derselben Wechselzahl und derselben Kurvengestalt, wie sie in dem Leitungsnetze vorhanden sind, an das später der betreffende Meßapparat angeschlossen werden soll. Wenn dies nicht beachtet wird, kann man Angaben erhalten, die um mehrere Prozent fehlerhaft sind.¹⁾

3. Präzisionsstrommesser von Siemens & Halske.

Die neueren Präzisionsstrommesser von Siemens & Halske sind ebenfalls nach dem bei den Verbrauchsmessern (vergl. Gleichstromtechnik Kap. XII, 4, S. 230) angewendeten dynamometrischen Prinzip gebaut. Weil die dünnen, den Strom zu- und abführenden Federn keine starken Ströme leiten können, ohne heiß zu werden, werden die feste und die bewegliche Spule in Parallelschaltung von dem zu messenden Strome durchflossen.

Auch hier schaltet man jeder Spule so viel Vorschaltwiderstand ohne Temperaturkorrektur vor, daß die Einflüsse der Temperatur und der Selbstinduktion vernachlässigt werden können.

Da die Vorschaltwiderstände zumal bei Instrumenten für verschiedene Meßbereiche etwas groß ausfallen, sind diese Instrumente etwas umfänglich.

Auch der Wattverbrauch ist erheblich (etwa 40 Watt). Bei einem Instrument, welches aber nicht dauernd eingeschaltet wird, sondern nur gelegentlich zur Nachprüfung anderer Strommeßinstrumente dient, ist dies von untergeordneter Bedeutung.

Fig. 375 stellt das Instrument dar nach Entfernung des Schutzkastens.

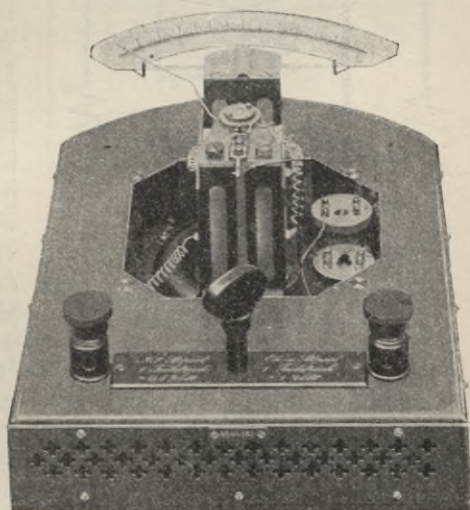


Fig. 375. Präzisionsstrommesser von Siemens & Halske.

¹⁾ Vergl. Kap. 8, 6, S. 114.

4. Präzisionsstrommesser der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft.

Nach dem auf S. 468 erläuterten Grundgedanken sind auch die Präzisionsampèremeter der A. E.-G. konstruiert.

Die feste Spule wird von dem zu messenden Strom durchflossen, während die bewegliche Spule im Nebenschluß liegt, wie aus der Fig. 376 hervorgeht. Der Vorschaltwiderstand befindet sich zu beiden Seiten des Instrumentes unter einem durchlöcherten Schutzblech. Das Feld wird hier nicht von einem Dauermagneten, sondern von dem zu messenden Strom in der festen Spule erzeugt. Natürlich kann man auf diese Weise bei derselben Größe des Instrumentes kein so starkes magnetisches Feld erhalten, wie durch einen Dauermagneten. Es muß infolgedessen der Meßwiderstand viel größer gewählt werden, damit man eine größere Klemmenspannung für den Nebenschluß erhält.

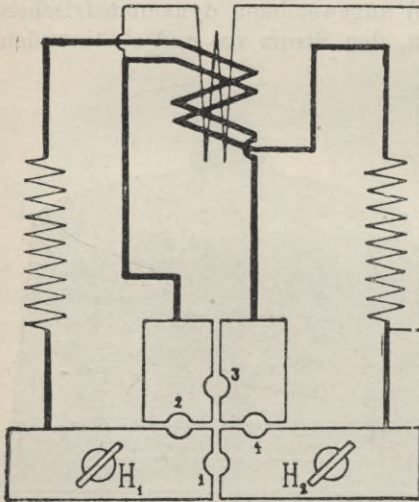


Fig. 376. Schaltung am Präzisionsampèremeter der A. E.-G.

Würde dieser induktionsfrei sein und aus einem Material ohne Temperatur-Koeffizienten bestehen, wie dies bei den Meßwiderständen bei Gleichstrom üblich ist, so würde das Instrument selbst von der Periodenzahl nicht unabhängig sein und einen gewissen Temperatur-Koeffizienten besitzen, weil die bewegliche Spule aus vielen Windungen aus Kupferdraht besteht. Wenn man den Meßwiderstand aber so wählt, daß er dasselbe Verhältnis des induktiven zum ohmischen Widerstande und denselben Temperatur-Koeffizienten besitzt wie die bewegliche Spule,

so sind die Angaben des Instrumentes unabhängig von der Periodenzahl und von der Temperatur. Um dies zu erreichen, ist es nicht nötig den Widerstand besonders dazu einzurichten, sondern man erhält den erforderlichen induktiven Widerstand und den erforderlichen Temperatur-Koeffizienten, wenn man zu dem Meßwiderstande die Drahtwindungen der festen Spule hinzunimmt, also das Instrument so schaltet, wie es in Fig. 376 schematisch dargestellt ist. Auf diese Weise ist es gelungen die Angaben dieser Ampèremeter unabhängig von der Temperatur und unabhängig von der Stromart zu machen, sodaß dieselbe Skala für Gleichstrom und Wechselstrom

verwendet werden kann, wobei nur ein kleiner Einfluß des magnetischen Feldes der Erde zu berücksichtigen ist, der durch Umkehrung des Stromes ausgeglichen werden kann.

Um bei den Wattmetern und Ampèremetern die Stöpsellöcher 2, 3, 4 nicht zu verbrennen und dadurch zu schlechten Kontakten Veranlassung zu geben, dürfen die betreffenden Stöpsel niemals unter Strom gezogen werden, sondern es ist vorher immer ein Stöpsel in 1 zu stecken, der das Instrument kurz schließt.

5. Induktions-Ampèremeter der A. E.-G.

Diese Ampèremeter sind im Prinzip genau so gebaut, wie die auf S. 471 beschriebenen Induktions-Voltmeter.

Für die Hochspannungs-Ampèremeter werden bei diesen Instrumenten Stromwandler, das sind kleine Transformatoren, verwendet. Fig. 377 zeigt das Schema einer Strommessung mittels eines Stromwandlers. Die Ansicht eines solchen für 250 Ampère zeigt Fig. 378. Die Spule, welche den zu messenden hochgespannten Strom führt und die beispielsweise in Fig. 379 aus einer Windung besteht,

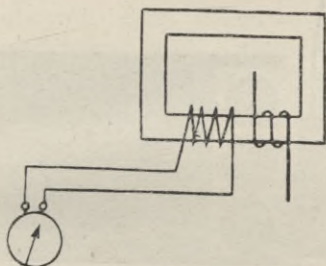


Fig. 377. Strommessung unter Anwendung eines Stromwandlers.

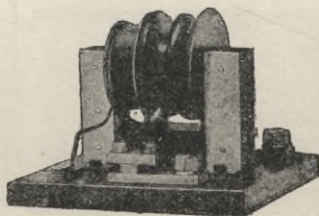


Fig. 378. Stromwandler der A. E.-G.

ist sehr sorgfältig isoliert. Die sekundäre Wickelung, welche zum Meßinstrumente führt, hat nur geringe Spannung. Das Instrument selbst gleicht äußerlich ganz dem in Fig. 364 und 365 abgebildeten Voltmeter.

Die Anwendung von Stromwandlern ist aber nicht nur bei Hochspannung zweckmäßig, sondern auch bei Niederspannung, wenn es sich um große Stromstärken handelt. In solchen Fällen müßte man den zur Leitung erforderlichen Kupferquerschnitt im Instrument selbst unterbringen und würde dadurch zu einer umständlichen Verlegung der stromführenden Schienen genötigt. Jetzt wird ein Stromwandler in die stromführende Schiene eingebaut, und zum Instrumente selbst führen nur zwei dünne Drähte, wie dies aus Fig. 379 zu ersehen

ist, die ein solches Ampèremeter mit Stromwandler für 3000 Ampère vorstellt.

Die Verwendung von Stromwandlern zur Strommessung gewährt noch einen anderen Vorteil. Man kann nämlich dasselbe Instrument

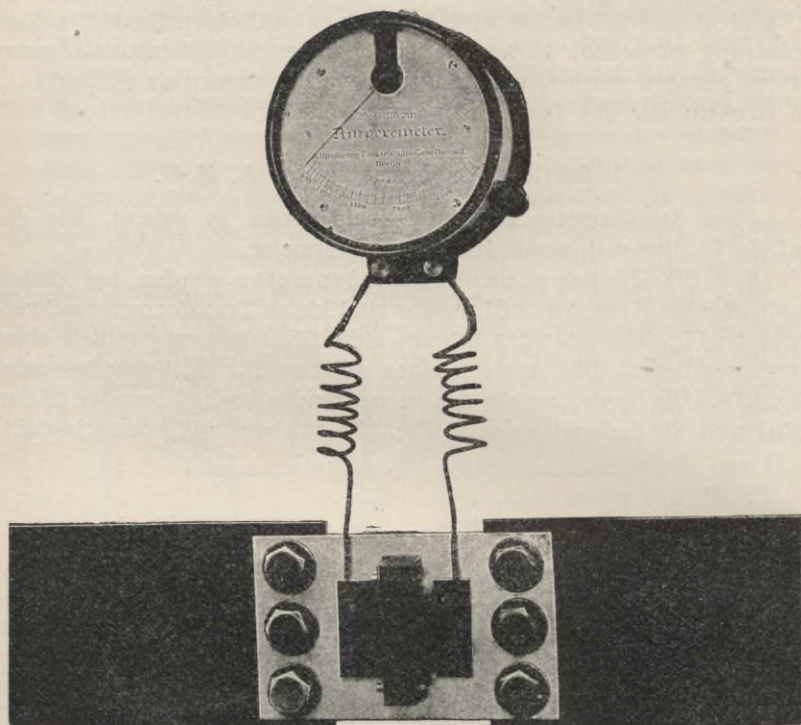


Fig. 379. Induktions-Ampèremeter mit Stromwandler.

mit Hilfe eines Umschalters zur Vergleichung mehrerer Stromkreise verwenden, ohne die Ströme selbst zu unterbrechen. Das ist namentlich bei Drehstrom ein Vorteil, wo es häufig erforderlich ist, die Ströme in den einzelnen Phasen untereinander genau vergleichen zu können.

Neuerdings bedienen sich die meisten größeren Firmen der Strom- und Spannungswandler für alle Schaltbrettinstrumente.

28. Kapitel.

Leistungsmesser für Wechsel- und Drehstrom.

1. Arbeitsmessung bei Wechselstrom.

Da die Arbeit eines elektrischen Stromes zumeist in Watt ausgedrückt wird, führen die zur Messung derselben dienenden, genauen Meßinstrumente den Namen Wattmeter. Einfachere für den Gebrauch in elektrischen Anlagen bestimmte Zeigerapparate, an die man geringere Ansprüche hinsichtlich der Genauigkeit stellen kann, nennt man Wattzeiger.

Die Wattmeter oder elektrischen Arbeitsmesser sind Elektrodynamometer, deren eine Spule von dem Hauptstrom durchflossen wird, während die andere Spule in einem induktionsfreien Nebenschluß mit hohem Widerstande liegt, so daß der sie durchfließende Strom der Spannung proportional ist und die Phasenverschiebung des Stromes gegen die Spannung durch die Selbstinduktion der dünnadrätigen Spule möglichst gering ausfällt.

Derartige Apparate sind von verschiedenen größeren Firmen konstruiert worden, die sich mit Messungen an Wechselströmen zu befassen haben. Eines der bekanntesten und bewährtesten Instrumente dieser Art ist das von Ganz & Co. in Budapest herrührende Wattmeter von O. T. Bláthy.¹⁾ Da dieses Instrument aber schon vielfach

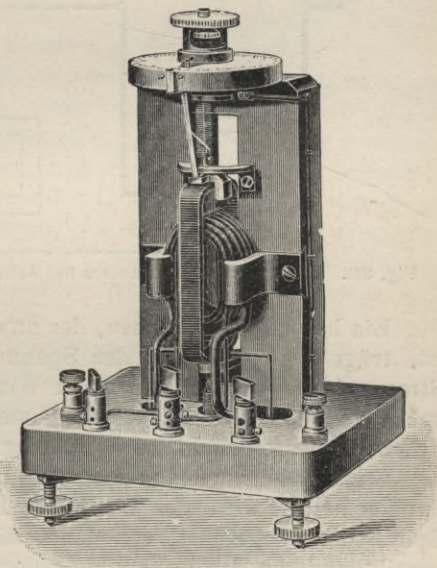


Fig. 380. Wattmeter von Siemens & Halske.

¹⁾ Eine genauere Beschreibung des Ganzschen Wattmeters und seines Gebrauches findet man z. B. in A. Cl. Feldmann, Wirkungsweise, Prüfung und Berechnung der Wechselstrom-Transformatoren, Leipzig, O. Leiner, S. 261. Vergl. auch Grundzüge der Gleichstromtechnik Kap. XII, 3., S. 229.

anderwärts beschrieben worden ist, geben wir hier nur die Beschreibung des Elektrodynamometers zu Arbeitsmessungen von Siemens & Halske.

Die vorstehende Abbildung (Fig. 380) stellt dieses Instrument dar.

Die dickdrähtige, vom Hauptstrome durchflossene Spule ist fest und besteht aus zwei parallelen Wickelungen, von denen die eine verwendet wird, wenn es sich um die Messung schwächerer Ströme handelt, die andere, wenn stärkere Ströme zu messen sind. Die Enden dieser vier Spulen sind zu je zwei Klemmen geführt, deren Anordnung auf der Fußplatte des Instrumentes aus der Schaltungsskizze Fig. 381 zu erkennen ist. Die Klemmen J und J' sind die Enden der dickdrähtigen, i und i' die Enden der aus weniger dickem Drahte bestehenden vom Hauptstrome durchflossenen festen Spule.

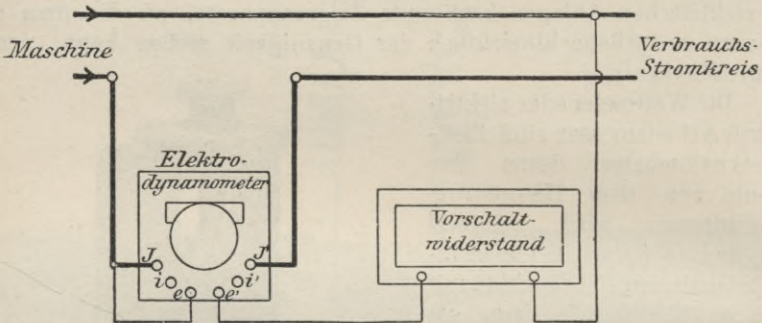


Fig. 381. Schaltung des Wattmeters bei Arbeitsmessungen eines Wechselstromes.

Ein beweglicher Rahmen, der an einem dünnen Faden aufgehängt ist, trägt die von einem der Spannung proportionalen, schwachen Strome durchflossene, aus vielen Windungen bestehende Spannungsspule. In der Gleichgewichtslage stehen die Windungen der beweglichen Spule senkrecht zu denen der festen.

Ganz ähnlich wie bei den vorher (S. 462) beschriebenen Elektrodynamometern wird der beweglichen Spule der Strom durch zwei Spiralfedern zugeführt, von denen die eine oben den Aufhängefaden umgibt und am Torsionsknopfe befestigt ist, während die andere am unteren Ende des Rahmens angebracht ist. Durch gut isolierte Drähte stehen diese Spiralfedern mit den Klemmen e und e' in leitender Verbindung. Die Messung der von der festen auf die bewegliche Spule ausgeübten Anziehungskraft erfolgt, ganz wie bei den Elektrodynamometern von Siemens & Halske, durch die elastische Gegenkraft der Torsion der oberen Feder.¹⁾

¹⁾ Vergl. Grundzüge der Gleichstromtechnik, Kap. VII, 2., S. 158.

Während man den zu messenden Hauptstrom durch eine der feststehenden Spulen hindurch gehen läßt, sendet man einen der Spannung proportionalen schwachen Strom durch die bewegliche Spule. Für Ströme unter 25 Ampère legt man die den Hauptstrom führenden Drähte an die Klemmen i und i' , für stärkere Ströme benutzt man die Klemmen J und J' .

Von der Klemme e' führt man einen Draht zu dem induktionsfreien Vorschaltwiderstand und von da an einen der beiden Punkte, zwischen denen man die Spannung messen will; den anderen Punkt verbindet man durch einen Leitungsdraht mit der Klemme e .

Dem Instrument wird daher ein induktionsfrei gewickelter, in mehrere Stufen eingeteilter Vorschaltwiderstand aus Rheotandraht oder Manganindraht beigegeben, der entweder ganz oder abteilungsweise vor die bewegliche Spule geschaltet wird. Der Vorschaltwiderstand soll den Widerstand der beweglichen Spule so sehr überwiegen, daß der Einfluß der Selbstinduktion der Spule verschwindend klein ist und in den meisten Fällen vernachlässigt werden darf.

Ist die ungefähre Stärke des Nutzstromes nicht bekannt, so nimmt man für den Nutzstrom zuerst immer die stärkere Wickelung der festen Spule und schaltet den gesamten verfügbaren Widerstand vor die bewegliche Spule. Die bewegliche Spule darf sich nur mäßig erwärmen; in der jedem Instrument beigegebenen Aichungstabelle ist deshalb die Stromstärke angegeben, die nicht überschritten werden soll. Es ist ferner bei der Schaltung darauf zu achten, daß zwischen den Spulen des Elektrodynamometers keine hohen Spannungen auftreten. Man wird deshalb den aus beweglicher Spule und Vorschaltwiderstand bestehenden Nebenschlußkreis stets so zwischen die beiden zum Verbrauchskreis führenden Zuleitungen legen, daß die feste und die bewegliche Spule an dieselbe Zuleitung angeschlossen sind, indem man die Klemme e der beweglichen Spule (Fig. 381) mit der Klemme J der festen Spule verbindet. Würde man umgekehrt verfahren, also die feste Spule und den Vorschaltwiderstand an die eine Zuleitung, die bewegliche Spule an die andere Zuleitung legen, so würde bei hochgespannten Strömen zwischen fester und beweglicher Spule eine beträchtliche Spannung auftreten, die ein Überspringen von Funken und infolgedessen Beschädigungen der Spulen verursachen könnte.

Um ein längeres Hin- und Herschwanken der beweglichen Spule zu vermeiden, ist das Elektrodynamometer mit Flüssigkeitsdämpfung versehen; zwei mit der beweglichen Spule verbundene Flügel tauchen in zwei in das Grundbrett des Instrumentes eingelassene Näpfe ein, die mit einer nichtleitenden Flüssigkeit¹⁾ zu füllen sind. Zum Ent-

¹⁾ Siemens & Halske schlagen reines Wasser vor; wir geben einer Füllung mit reinem Petroleum den Vorzug.

leeren und Ausspülen der Nöpfe dient ein kleiner an der Vorderkante des Grundbrettes angebrachter Hahn.

2. Theorie des Wechselstrom-Wattmeters.

Die von einem Wechselstrom geleistete Arbeit A wird, sofern die Strom- und Spannungskurven nahezu die Gestalt einer Sinoide haben, ausgedrückt durch das Produkt:

$$A = J \cdot E \cdot \cos \chi \dots \dots \dots 1)$$

wenn J die effektive Stromstärke, E die effektive Spannung und χ den Winkel der Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung bedeutet.

Der Fehler, der durch eine von der Sinoide abweichende Form der Strom- und Spannungskurve veranlaßt wird, kann bei Messungen in der Praxis ohne weiteres vernachlässigt werden.

Infolge der Selbstinduktion der beweglichen Spule erleidet der schwache Strom i , der durch die bewegliche Spule fließt, eine weitere Phasenverschiebung φ gegen die Spannung, sodaß

$$i \cdot (W + w) = E \cdot \cos \varphi \dots \dots \dots 2)$$

gesetzt werden muß. Die durch die feste und durch die bewegliche Spule des Elektrodynamometers fließenden Ströme besitzen daher einen Phasenunterschied $\chi - \varphi$, sodaß sich

$$J \cdot i \cdot \cos (\chi - \varphi) = C \cdot a \dots \dots \dots 3)$$

ergibt, wobei C eine dem Instrumente eigentümliche Konstante und a der Torsionswinkel ist. Aus den Gleichungen 1) und 3) folgt:

$$A = C \cdot a \cdot (W + w) \cdot \frac{\cos \chi}{\cos \varphi \cdot \cos (\chi - \varphi)} \dots \dots 4)$$

wenn man mit W und w die Widerstände der beweglichen Spule und des Vorschaltwiderstandes bezeichnet.

Der Korrektionsfaktor

$$F = \frac{\cos \chi}{\cos \varphi \cdot \cos (\chi - \varphi)} \dots \dots \dots 5)$$

mit dem man den aus dem abgelesenen Torsionswinkel direkt sich ergebenden Wert

$$C \cdot a \cdot (W + w)$$

zu multiplizieren hat, ist fast immer nahezu 1, sodaß er für den praktischen Gebrauch zu vernachlässigen ist, weil durch Vorschalten des großen induktionsfreien Widerstandes die durch die Selbstinduktion der beweglichen Spule hervorgerufene Phasenverschiebung φ sehr klein gemacht wird. Zur Bestimmung des Korrektionsfaktors F bedarf man der Kenntnis des Selbstinduktionskoeffizienten l und des Widerstandes w der beweglichen Spule, deren Werte aus der Eichungstabelle zu entnehmen sind, ferner des Selbstinduktionskoeffizienten L und des Widerstandes R des Arbeitskreises und der Periodenzahl \sim des Wechselstromes. Der oben für den Korrektionsfaktor F angegebene

Ausdruck läßt sich auf die Form bringen (v. Stefansche Gleichung):

$$F = \frac{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi}{1 + \operatorname{tg} \varphi \cdot \operatorname{tg} \chi} \quad \dots \quad 6)$$

Aus den beiden Gleichungen:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{2 \pi \sim l}{W + w} \quad \dots \quad 7)$$

und

$$\operatorname{tg} \chi = \frac{2 \pi \sim L}{R} \quad \dots \quad 8)$$

ergibt sich dann der Korrektionsfaktor:

$$F = \frac{1 + 4 \pi^2 \sim^2 \cdot \frac{l^2}{(W + w)^2}}{1 + 4 \pi^2 \sim^2 \cdot \frac{l}{W + w} \cdot \frac{L}{R}} \quad \dots \quad 9)$$

Der Selbstinduktionskoeffizient L und der Widerstand R des Arbeitskreises sind meist nicht bekannt. Man findet die Phasenverschiebung $\chi - \varphi$ nach der Gleichung

$$\cos (\chi - \varphi) = \frac{C \cdot \alpha \cdot (W + w)}{J \cdot E \cdot \cos \varphi} \quad \dots \quad 10)$$

wenn man die Stromstärke J und die Spannung E des Nutzstromes mit Hilfe eines geeigneten Strom- und Spannungszeigers oder eines Elektrodynamometers für Strommessungen und eines astatischen Elektrodynamometers für Spannungsmessungen besonders bestimmt und φ mit Hilfe von Gleichung 7) berechnet.

Der Korrektionsfaktor F besitzt den Wert 1 für $\varphi = 0$ und $\varphi = \chi$; in diesen Fällen ist also keine Korrektion erforderlich. Seinen größten Einfluß übt er bei $\varphi = \frac{\chi}{2}$ aus. Über die Größe der Korrektion

möge folgendes Zahlenbeispiel Aufschluß geben. Die bewegliche Spule des Elektrodynamometers habe den Widerstand $w = 200$ Ohm und den Selbstinduktionskoeffizienten $l = 0,07$ Henry. Durch passende Verwendung des Vorschaltwiderstandes soll der Strom der beweglichen Spule auf etwa 0,03 Ampère gehalten werden. Als Periodenzahl sei $\sim = 50$ angenommen. Es ergibt sich dann folgende Tabelle:

Klemmen- spannung Volt	Korrektion von A in Prozenten für				
	$\chi = 0^0$	$\chi = 20^0$	$\chi = 40^0$	$\chi = 60^0$	$\chi = 80^0$
50	0,01741	— 0,46	— 1,08	— 2,22	— 6,94
100	0,00435	— 0,23	— 0,54	— 1,13	— 3,60
500	0,00017	— 0,04	— 0,11	— 0,23	— 0,74
1000	0,00004	— 0,02	— 0,06	— 0,11	— 0,37
2000	0,00001	— 0,01	— 0,03	— 0,06	— 0,19

Sieht man daher von den Fällen ab, in denen bei niedriger Betriebsspannung des Arbeitskreises die Phasenverschiebung des Nutzstromes gegen die Spannung sehr groß ist, so erkennt man, daß die Korrektion fast immer unberücksichtigt bleiben kann.¹⁾

3. Arbeitszeiger für Gleichstrom, Wechselstrom und Drehstrom von Siemens & Halske.

Vielfach hat man in der Praxis das Bedürfnis fortwährend die jeweilige Arbeitsleistung einer elektrischen Anlage beurteilen zu können. Um die Verhältnisse einer Wechselstromanlage übersehen zu können, sind immer drei Messungen erforderlich, da sich die Wechselstromarbeit aus drei Faktoren zusammensetzt: Strom, Spannung und Cosinus der Phasenverschiebung.

Während also bei einer Gleichstromanlage zwei Meßinstrumente: Stromzeiger und Spannungszeiger genügen, kommt bei einer Wechselstromanlage noch ein drittes Instrument hinzu, und das ist entweder ein Arbeitszeiger oder ein Phasemesser.

Um eine Vorstellung davon zu geben, wie elektrische Arbeitszeiger für den Maschinenraum konstruiert werden können, beschreiben wir zunächst den Arbeitszeiger für Gleichstrom, Wechselstrom und Drehstrom von Siemens & Halske.

Auch diesem Apparate liegt das elektrodynamometrische Prinzip zu Grunde. Eine bewegliche, mit dünnem Kupferdraht bewickelte Spule befindet sich innerhalb einer festen, mit dickem Kupferdraht versehenen oder aus Flachkupfer hergestellten Spule. (Vergl. Fig. 382.) Der beweg-

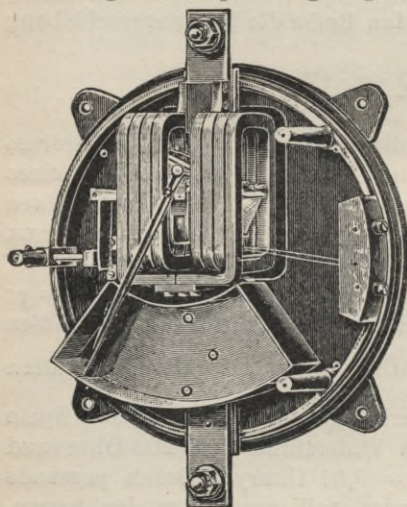


Fig. 382. Arbeitszeiger von Siemens & Halske.

Flachkupfer hergestellten Spule.

¹⁾ In der Zeitschrift *Electrician* 1902, S. 818 (auch *Helios* 1902, Heft 32, S. 844) wird vorgeschlagen den Fehler, der durch die Selbstinduktion der dünnadrätigen Spule entsteht, dadurch zu ermitteln, daß man in den Stromkreis der dünnadrätigen Spule ohne Änderung des Widerstandes eine Versuchsspule einschaltet, deren Selbstinduktion gleich der der dünnadrätigen ist, und mit dieser die Messung zu wiederholen. Vermittels eines Umschalters könnte bald die Versuchsspule, bald ein nichtinduktiver Widerstand von gleicher Größe eingeschaltet werden. Nimmt durch die Einschaltung der Versuchsspule die Angabe um $K\%$ zu, so hat man von der ursprünglichen Ablesung $K\%$ zu subtrahieren, um den richtigen Wert zu erhalten.

lichen Spule wird der Strom i durch zwei isoliert auf der Achse befestigte Federn zugeleitet, die gleichzeitig die Gegenkraft für die ablenkende Wirkung der Ströme bilden. Die Windungsflächen beider bilden einen stumpfen Winkel miteinander. Werden nun beide Spulen vom Strom durchflossen, so wird die bewegliche Spule bestrebt sein, sich mit ihrer Achse parallel derjenigen der festen zu stellen, sodaß ihre Kraftlinien in derselben Richtung und in gleichem Sinne verlaufen wie diejenigen der festen. Der Winkel, den die bewegliche Spule hierbei beschreibt, ist proportional dem Produkte aus den beiden, die feste und die bewegliche Rolle durchfließenden Strömen, sodaß wir schreiben können:

$$J \cdot i = C \alpha,$$

wenn J , i die Ströme, α den Ausschlagswinkel und C eine von der Bauart des Apparates abhängige Konstante bedeutet. Schaltet man vor die bewegliche Spule, die den Widerstand w besitzen möge, soviel bifilar gewickelten, aus Manganindraht hergestellten Widerstand (W), daß der Gesamtwiderstand des beweglichen Spulenkreises als unabhängig von der in ihm erzeugten Stromwärme und der Lufttemperatur angesehen werden kann, so kann man statt i die an den Endpunkten des beweglichen Spulenkreises herrschende Spannung (E) einsetzen, also, da sehr angenähert $i = E : (W + w)$ ist:

$$J \cdot E = C \cdot (w + W) \cdot \alpha.$$

Das Produkt $J \cdot E$ stellt bei Gleichstrom die zwischen den Punkten des Hauptkreises, zwischen denen $(w + W)$ liegt, geleistete Arbeit dar.

Bei Wechselstrom würde diese Arbeit

$$A = J \cdot E \cdot \cos \chi$$

sein, wenn χ den Winkel der zwischen Strom und Spannung im Hauptkreise herrschenden Phasenverschiebung bezeichnet. Bedeutet ferner φ den Winkel der Phasenverschiebung, die zwischen dem Strom in der beweglichen Spule und der an den Enden ihres Kreises bestehenden Spannung vorhanden ist, so erhalten wir für die Wechselstromarbeit den Ausdruck (vergl. S. 484, Gleichung 4)

$$A = J \cdot E \cdot \cos \chi = C \cdot (W + w) \cdot \alpha \cdot \frac{\cos \chi}{\cos \varphi \cdot \cos (\chi - \varphi)}. \quad 11)$$

Der Korrektionsfaktor $\frac{\cos \chi}{\cos \varphi \cdot \cos (\chi - \varphi)}$

wird = 1, wenn φ den Wert 0 annimmt, was sehr nahe durch geeignete Gestaltung der beweglichen Spule und durch passende Wahl des vor dieselbe geschalteten, bifilar gewickelten Manganin-Widerstandes erreicht werden kann und tatsächlich bei den Siemensschen Arbeitszeigern sehr nahe erzielt wird. Die Folge davon ist, daß die Instrumente stets richtig zeigen, ganz einerlei, ob Gleichstrom oder gewöhnlicher Wechselstrom sie durchfließt, und ob und welche Phasen-

verschiebung zwischen Strom und Spannung in dem betreffenden Wechselstromkreise herrscht. Auch die Form der Wechselstromkurven ist nur von geringem Einflusse auf die Angaben des Arbeitszeigers.

Für genauere Messungen, sowie für die Aichung von Schaltbrettinstrumenten bedient man sich des Präzisions-Wattmeters von Siemens & Halske, welches wir in der Gleichstromtechnik (Kap. XII, 4., S. 230) bereits beschrieben haben.

4. Arbeitszeiger von W. Thomson.

Dieser Apparat ist ein einfach konstruiertes Dynamometer, dessen feste Spule aus zwei aus dickem Kupferdraht gebogenen, nebeneinander liegenden Rechtecken besteht. (Vergl. Fig. 383.) Unter Zwischenlagerungen von Isolationsmaterial sind an dieses Rechteck zwei Haken

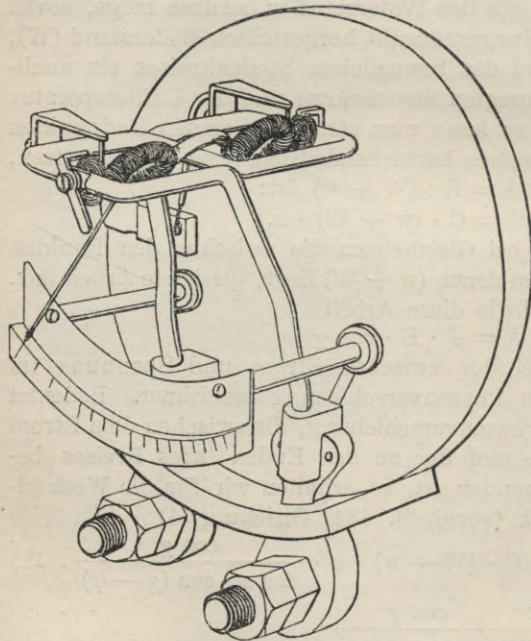


Fig. 383. Arbeitszeiger von W. Thomson.

aus Phosphorbronze befestigt, die zum Tragen der im Nebenschluß liegenden beweglichen Spulen bestimmt sind. Um das Instrument gegen die Einwirkung benachbarter Magnetfelder unempfindlich zu machen, besteht die Spannungsspule aus zwei Ringen, in denen der schwache, der Spannung proportionale Strom in entgegengesetzter Richtung verläuft. Diese beiden Ringe bilden also ein astatisches System. Die beiden vorher erwähnten Haken dienen als Unter-

stützung für die Achse der beweglichen Spule.

Auf der einen Seite wird die Achse durch eine ringförmige Schneide, auf der anderen Seite durch eine gerade Schneide gebildet. Die Zu- und Abführung des schwachen Stromes zu den beweglichen Spulen wird durch zwei flache Spiralfedern aus Palladium bewirkt, die in Fig. 383 zu sehen sind.

Um in dem Nebenschluß nur einen schwachen, der Spannung proportionalen Strom von etwa $\frac{1}{2}$ Ampère zustande kommen zu lassen, ist auf der Grundplatte ein gutventilierter, induktionsfreier Vorschaltwiderstand angeordnet, dessen Größe sich nach der Höhe der Spannung richtet.

Die eine ringförmige Spule des beweglichen astatischen Systems trägt einen Zeiger, der vor einer Skala spielt. An der anderen Spule ist ein regelbares Gegengewicht angeordnet, das der zwischen den festen und beweglichen Spulen wirksamen elektrodynamischen Anziehungskraft in den verschiedenen Stellungen das Gleichgewicht hält. (Man vergleiche die Fig. 384, in der die bewegliche Spule und ihre Aufhängung besonders dargestellt sind.) Die empirisch geteilte Skala gibt unmittelbar, je nach dem Meßbereiche des Instrumentes, Watt, Hektowatt oder Kilowatt an.

Die Schaltung erfolgt in derselben Weise, wie dies in Fig. 381, S. 482, für das Wattmeter von Siemens & Halske angegeben worden ist.

Damit der Zeiger sich möglichst ohne Schwankungen einstellt, ist es ratsam, an dem beweglichen Systeme noch eine Dämpfung anzubringen.

5. Induktions-Wattmeter der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft.

Diese Instrumente (vergl. Fig. 385) enthalten drei Magnete, von denen der mittlere im Hauptstrome, die beiden äußeren im Neben-

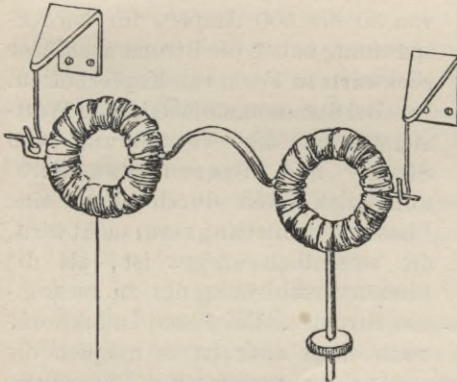


Fig. 384. Die beweglichen Spulen des W. Thomson'schen Arbeitszeigers.

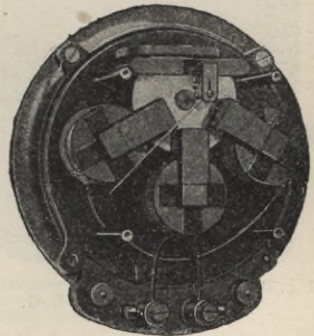


Fig. 385. Induktions-Wattmeter der A. E.-G.

schluß liegen. Die Metallschirme befinden sich nur auf den beiden äußeren Magneten; außerdem ist noch ein Dauermagnet zur Dämpfung vorhanden. In den Nebenschluß ist noch eine Drosselspule einzuschalten. Im übrigen stimmt die Einrichtung mit dem auf S. 471 beschriebenen Induktions-Voltmeter überein.

Auch bei den Wattmetern dieses Systems ist, wie bei den Ampèremetern, die Anwendung von Stromwandlern möglich. Um aber das gewünschte Ziel, nämlich Instrumente, die gar keine Hochspannung führen, zu erreichen, muß auch der Nebenschlußstrom umgeformt werden. Dies geschieht mittels der Spannungswandler, die sich von gewöhnlichen Transformatoren nur durch eine andere Anordnung unterscheiden. Es gehört demnach zu jedem Wattmeter ein bestimmter Stromwandler und ein bestimmter Spannungswandler. Der Strom-

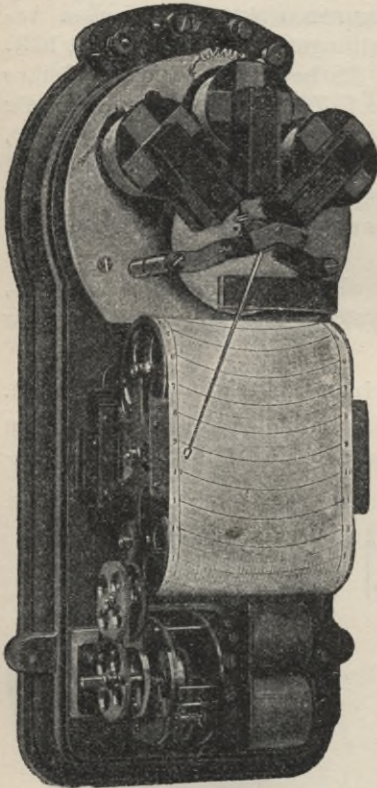


Fig. 386. Registrierendes Hochspannungswattmeter der A. E. G.

wandler ist ebenso beschaffen wie bei den Ampèremetern. Auch bei sehr großen Stromstärken kommt ein Spannungswandler zur Verwendung, um die Unterbringung der großen Kupferquerschnitte im Instrument selbst zu vermeiden. Die Wattmeter bis 30 Ampère und 550 Volt Spannung (Phasenspannung) haben ein Messinggehäuse und 4 Schraubenklemmen auf der Vorderseite, ebenso die Wattmeter für Hochspannung mit Strom- und Spannungswandler, sowie die Wattmeter für Niederspannung von 600 bis 4000 Ampère. Die Wattmeter von 30 bis 600 Ampère für Niederspannung haben die Stromanschlüsse rückwärts in Form von Kupferbolzen.

Bei den dynamometrischen Wattmetern ist die Verwendung von Strom- und Spannungswandlern unmöglich, weil durch diese eine Phasenverschiebung verursacht wird, die wesentlich anders ist, als die Phasenverschiebung des zu messenden Stromes. Bei diesen Induktions-

wattmetern aber ist es möglich die von den Strom- und Spannungswandlern verursachte Phasenverschiebung auszugleichen und so Instrumente herzustellen, deren Angaben von dem $\cos \varphi$ unabhängig sind. Dies ist ein Vorteil, der den Induktions-Wattmetern allein zukommt.

Bei den Induktions-Wattmetern ist es möglich ein starkes Drehmoment zu erzielen. Daher kann man sie zu registrierenden Instrumenten leicht ausbilden, bei welchen der Ausschlag des Instrumentes

nicht erst durch ein Relais auf ein Schreibwerk übertragen wird, sondern wo der Zeiger selbst die Feder trägt, die auf einen Papierstreifen die Leistung aufzeichnet. (Vergl. Fig. 386.) Der Papierstreifen geht über zwei Rollen, die von einem Uhrwerk so angetrieben werden, daß der Streifen in einem Tage abläuft. Auch registrierende Hochspannungsvoltmeter können unter Anwendung von Spannungswandlern in ähnlicher Weise gebaut werden.

6. Tragbares aperiodisches Weston-Präzisions-Wattmeter.

Unter den Präzisionsinstrumenten, die dazu dienen von Zeit zu Zeit die Schaltbrettinstrumente auf die Richtigkeit ihrer Angaben nachzuprüfen, stehen in allererster Linie die von der European Weston Electrical Instrument Co. in Berlin hergestellten Apparate.

Im Prinzipie ist deren Wattmeter ähnlich konstruiert wie das auf S. 466 beschriebene Präzisionsvoltmeter. (Vergl. auch Gleichstromtechnik Kap. XI, 4., S. 206). Eine feststehende vom Strome durchflossene Feldspule erzeugt bei den Wechselstrominstrumenten das magnetische Feld, welches bei den Gleichstrominstrumenten von einem Dauermagneten hervorgerufen wird. In diesem Felde ist eine leichte Spule, bestehend aus 280 Windungen dünnem Aluminiumdraht, beweglich; diese Spule, eventuell mit einem großen induktionsfreien Vorschaltwiderstande zusammen, bildet einen Nebenschluß von hohem Widerstande und wird von einem der Spannung proportionalen, schwachen Strome durchflossen.

Die Zu- und Abführung des Stromes zur beweglichen Spule erfolgt wie bei den an anderer Stelle beschriebenen Gleichstrominstrumenten durch Federn aus einer besonderen Legierung; gleichzeitig bedingt die Elastizität dieser Feder die Einstellung der Spule in bestimmte Lagen.

Um das Instrument völlig aperiodisch zu machen, ist an die Verlängerung der Achse der beweglichen Spule der leichte Kolben einer Luftdämpfung¹⁾ angebracht, der sich bei Drehung der Achse im Innern eines hohlen Ringsektors verschiebt. Bei den früher S. 466 beschriebenen Wechselstrom-Voltmetern derselben Firma trägt der Zapfen der beweglichen Spule leichte Aluminiumflügel, die in einer Kammer schwingen (vergl. Fig. 361) und eine Luftdämpfung nach Töplerschem Prinzipie veranlassen. Diese Flügel sind sehr leicht und zum beweglichen System symmetrisch angeordnet; sie vergrößern das Trägheitsmoment der Spule nur unerheblich.

¹⁾ Ähnlich der Gleichstromtechnik Kap. XII, 4., S. 231 beschriebenen Luftdämpfung.

Die in Fig. 387 gegebene schematische Zeichnung des Westonwattmeters stellt eine für drei verschiedene Stromstärken verwendbare Form der Ausführung vor. Die feststehende Feldspule besteht nämlich aus 4 Abteilungen, welche mit den Nummern 1, 2, 3, 4 bezeichnet sind. Die

Enden dieser Abteilungen gleiten durch Federn auf einer Kontaktwalze, die an der linken Seite des Apparates angebracht ist. An dieser Walze sind die Kontakte so geordnet, daß je nach der zu verwendenden Stromstärke alle 4 Abteilungen der Feldspule hintereinander oder die 4 Abteilungen in zwei Gruppen hintereinander und diese parallel geschaltet oder endlich alle Abteilungen vom

Strome parallel durchlaufen werden. Man kann auf diese Weise dasselbe Instrument für Belastungen verwenden, die sich wie 1 : 2 : 4 verhalten.

Die Feldspule ist bei allen Apparaten so bemessen, daß 240 Ampèrewindungen verwendet werden

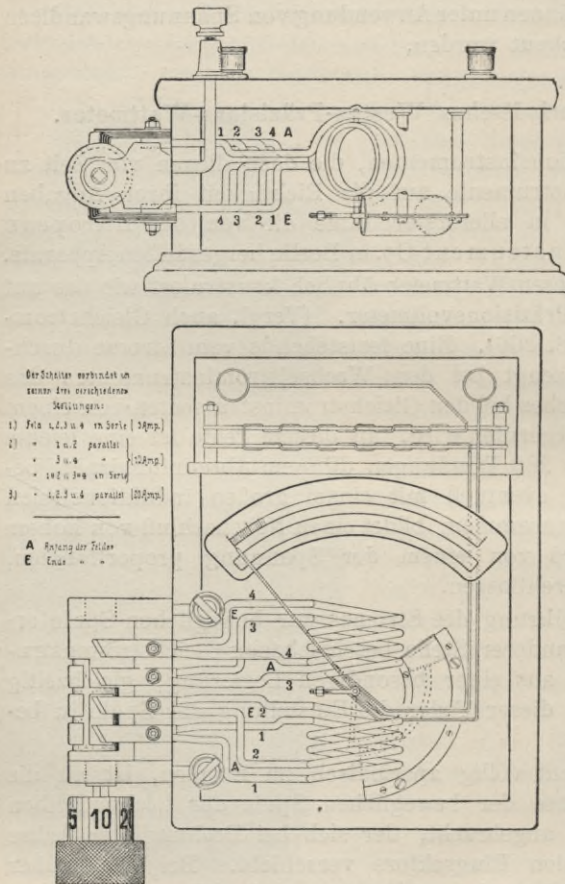


Fig. 387.
Weston-Wattmeter.

den, um eine Empfindlichkeit zu erzielen, bei der 1 Volt einem Vorschaltwiderstand von 20 Ohm entspricht. Der Selbstinduktionskoeffizient der beweglichen Spule beträgt 0,0034 Henry.

Instrumente mit einer maximalen Stromkapazität von 25 Ampère und darunter sind mit einer Kompensationswicklung versehen, durch welche die Ablesungen dieser Instrumente ohne weiteres für die im Apparat selbst verbrauchte Energie korrigiert werden.

Für Instrumente der Meßbereiche von 50 Ampère aufwärts ist keine Kompensationsspule vorhanden, da alsdann die im Apparat verbrauchte Energie im Vergleich zur Ablesungsfähigkeit der Instrumente als verschwindend nicht in Betracht kommt.

Die mit Kompensationsspule versehenen Instrumente sind durch eine dritte Hartgummiklemme gekennzeichnet, welche sich zwischen den mit a und b bezeichneten Klemmen des Spannungsstromkreises befindet und auf dem Instrument mit dem Bezeichnungsschild N. C. (nicht kompensiert) versehen ist. Fig. 388 zeigt schematisch die innere Anordnung der kompensierten Instrumente. Die gestrichelten Linien bezeichnen die Kompensationsspule.

Die Kompensationswicklung wird jedoch nicht verwendet:

Bei der Aichung oder Kontrolle dieser Instrumente mit voneinander unabhängigen Strom- und Spannungsquellen, bei der Prüfung von Generatoren, bei Prüfungen mit Wechselstrom, bei welchen große Phasenverschiebungen auftreten können, und bei welchen es daher wünschenswert ist die Selbstinduktion der Nebenschlußspule auf ein Minimum zu bringen.

Eine Anzahl Windungen des Spannungsstromkreises ist so auf die Feldspule gewickelt, daß der Strom in der Feldspule in dieser Kompensationswicklung (in Fig. 388 gestrichelt gezeichnet) in entgegengesetzter Richtung fließt. Dadurch wird der Anschlag des Instrumentes um einen kleinen Betrag vermindert, der der in der Nebenschlußspule verbrauchten Energie proportional ist.

Bei Benutzung der Kompensationswicklung muß also der Spannungsstromkreis einen Nebenschluß zum Prüfungsobjekt allein unter Ausschluß der Feldspule bilden.

Wenn man die Spannungsspule nur im Nebenschluß zum Prüfungsobjekt legt, fließt durch die Feldspule ein um den Betrag $i^2 r_1$ größerer Strom als durch das Prüfungsobjekt, worin i den durch die bewegliche Spule fließenden Strom, r_1 deren Widerstand bedeutet. Der gemessene Wert der Leistung ist alsdann um den Wert $i^2 r_1$ zu groß. Dieser Fehler wird durch die Kompensationswicklung korrigiert.

Verbindet man bei der Prüfung von Wechselstrommaschinen die Nebenschlußspule direkt mit den Klemmen des Stromerzeugers, so fließt durch die Feldspule ein Strom, welcher um den durch die

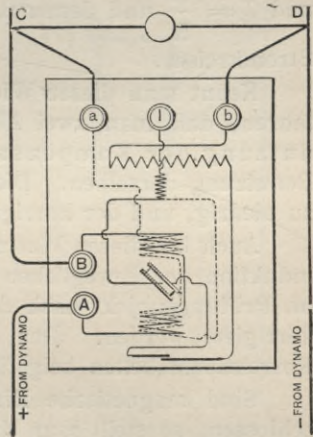


Fig. 388. Kompensationsspule am Weston-Wattmeter.

Nebenschlußspule fließenden Strom vermindert ist. Das Wattmeter gibt daher, auch wenn es ohne Kompensationswicklung benutzt wird, zu niedrige Ablesungen; bei Benutzung derselben wird die Ablesung nochmals um den gleichen Betrag vermindert werden.

Man würde somit einen doppelten Fehler in der Ablesung erhalten. Man benutze daher die Kompensationswicklung überhaupt nicht und korrigiere die Ablesungen nach folgender Überlegung. Der Hauptstrom sei J , der Strom durch die Nebenschlußspule i und die Spannung an den Klemmen des Generators E . Der durch die Feldspule fließende Strom ist alsdann $J - i$ und der prozentuale Fehler des Wattmeters $F = \frac{JE - (J - i)E}{JE} = \frac{i}{J}$.

Aber $i = \frac{E}{r_1}$; worin r_1 der Widerstand des Spannungskreises ist,

und $J = \frac{E}{R}$ und demnach $F = \frac{R}{r_1}$; wenn R der Widerstand des Stromkreises.

Kennt man diesen Widerstand nicht, so kann man auch so verfahren, daß man zwei Ablesungen macht; die eine W , ohne Benutzung der Kompensationswicklung und eine zweite W_1 mit Benutzung derselben. Die Ablesung W ist um den Betrag $W - W_1$ zu niedrig, und der korrigierte Wert ist $W + (W - W_1) = 2W - W_1$.

Auch bei diesen Wattmetern muß die Ablesung wegen der Selbstinduktion der beweglichen Spule und wegen der Phasenverschiebung im Prüfungsobjekt nach der v. Stefanschen Gleichung 6) (S. 485) korrigiert werden. Den Instrumenten werden zu diesem Zwecke Korrektionstabellen beigelegt.

Sind magnetische Einflüsse auf das Instrument nicht ausgeschlossen, so stellt man dasselbe so, daß der in der Mitte der Skala stehend gedachte Zeiger gerade nach Westen zeigt. Alsdann macht man eine Messung. Hierauf vertauscht man die Leitungen an beiden Stromkreisen, sodaß der Strom in entgegengesetzter Richtung das Instrument durchfließt und macht eine zweite Messung. Sind die Ergebnisse verschieden, so ist das arithmetische Mittel der Ablesungen der richtige Wert.

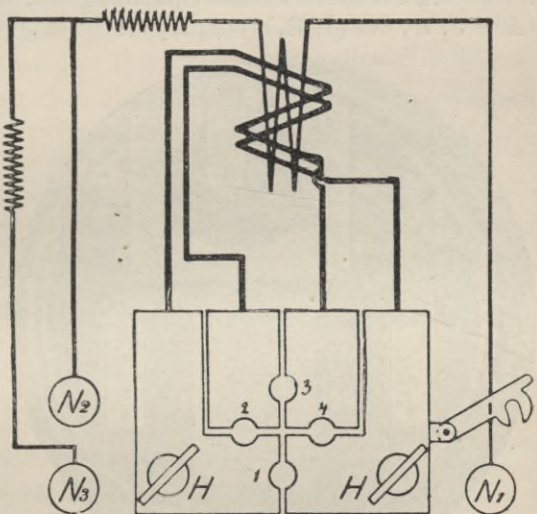
7. Präzisionswattmeter der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft.

Auf dieselbe Weise, wie die vorher S. 468 und 478 beschriebenen Präzisionsvolt- und Ampèremeter hat die A. E.-G. auch Wattmeter konstruiert, die teils als feinere Schalttafelinstrumente, teils als tragbare Prüfapparate ausgebildet sind.

Die feste Spule ist in den Hauptstromkreis, die bewegliche in den Nebenschluß eingeschaltet, und zwar besteht die feste Spule aus zwei Wickelungen. Führt man alle vier Enden derselben heraus zu einer kleinen Schalttafel, die auf dem Instrumente selbst angebracht ist, so können sie hintereinander und nebeneinander geschaltet werden, und man erhält so einen doppelten Meßbereich in bezug auf die Stromstärke. Zur Herstellung dieser Schaltung dienen zwei Stöpsel.

Fig. 389 zeigt diese Schaltung schematisch, wobei die Anschlußklemmen des Hauptstromes mit H und die Stöpsellöcher mit 1, 2, 3, 4 bezeichnet sind. Steckt man einen Stöpsel in 3, während die übrigen offen bleiben, so sind

die beiden Wickelungen hintereinandergeschaltet. Steckt man die Stöpsel in 2 und 4, während die übrigen offen bleiben, so sind beide Wickelungen parallel geschaltet und der Meßbereich ist infolgedessen doppelt so groß als vorher. Steckt man einen Stöpsel in 1, so ist das Instrument kurz geschlossen und der Strom geht unmittelbar von der einen Klemme zur anderen.



Man kann dann, ohne die Stöpsellöcher zu verbrennen, die anderen Stöpsel ziehen und umschalten. Die Klemmen für den Nebenschluß sind in Fig. 388 mit N₁, N₂, N₃ bezeichnet. Bei N₁ befindet sich ein beweglicher Haken, mittels dessen diese Klemme unmittelbar mit dem Hauptstrom verbunden werden kann. Dieser Anschluß muß gewählt werden, wenn es sich um Messungen in einem Hochspannungsstromkreise handelt.

Fig. 390 zeigt die innere Einrichtung eines solchen Instrumentes.

Selbstverständlich kann durch die Anwendung von Strom- und Spannungswandlern, wie bei den Induktionswattmetern, der Eintritt hoher Spannungen in die Schalttafelinstrumente ebenfalls fern gehalten werden.

8. Arbeitsmessung bei Drehstrom.

a) Bei ungleich belasteten Zweigen.

Die in einem Drehstromkreise vorhandene Leistung läßt sich, wenn wir mit i und e die Momentanwerte der Stromstärken und Spannungen benennen und ihre Indices entsprechend den aus Fig. 391 ersichtlichen Bezeichnungen wählen, als die Summe dreier gewöhnlicher Wechselstromleistungen darstellen, deren Momentanwert

$$a = e_1 i_1 + e_2 i_2 + e_3 i_3 \dots \dots \dots 12)$$

ist. Führen wir an Stelle der Momentanwerte i und e die mittleren Werte von Stromstärke und Spannung ein, so können wir schreiben

$$A = J_1 E_1 \cos (J_1/E_1) + J_2 E_2 \cos (J_2/E_2) + J_3 E_3 \cos (J_3/E_3) 13)$$

Von der Größe der drei Phasenverschiebungen (J_1/E_1) , (J_2/E_2) und (J_3/E_3) verschafft man sich Kenntnis durch Vornahme gleichzeitiger Strom- und Spannungsmessungen während der Wattmeterablesungen.

An der Hand der Gleichung 13) kann man sich also über die Größe der in einem

Drehstromkreise erzeugten und verbrauchten Energie und die in seinen drei Zweigen

vorhandenen Phasen-

verschiebungen in der Weise informieren, daß man mit dem Wattmeter unter Zuhilfenahme geeigneter Umschalter jede der drei Teilleistungen nach der für gewöhnlichen Wechselstrom angegebenen Methode mißt

und ihre Summe bildet. Bei gemischter Belastung von Licht und Kraft, besonders wenn die Lichtbelastung nur an einen Zweig angeschlossen ist, während die Energie für die Motoren von den drei

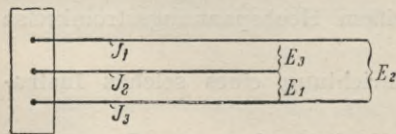


Fig. 391. Erläuterung der Bezeichnungen.

Leitungen abgenommen wird, kann die Phasenverschiebung in den drei Zweigen sehr verschieden sein. Falls es erwünscht ist, die drei Verschiebungen zu kennen, so kann dies etwa in der Weise erfolgen,

daß die drei Energien nach dem Nullpunkt des Netzes gemessen werden. Im allgemeinen ist es nur bei gleicher und gleichartiger Belastung der drei Drehstromzweige von Interesse die Phasenverschiebung zu ermitteln. Dieses Verfahren, aus drei Messungen die gesamte Drehstromenergie zu bestimmen, ist etwas umständlich und nur da zu empfehlen, wo man bei ungleicher Belastung der drei Drehstromzweige sich über den Betrag einer jeden der drei Teilleistungen oder über die Größe der Phasenverschiebungen unterrichten will. Ist es uns hingegen nur darum zu tun, bei einem Drehstromnetz mit ungleich belasteten Zweigen die in demselben vorhandene Gesamtleistung zu bestimmen, so werden wir von der Tatsache Gebrauch machen, daß die Gesamtenergie desselben sich in zwei gewöhnliche Wechselstromenergien zerlegen läßt, werden diese einzeln messen und sie dann addieren.

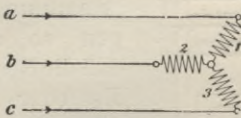


Fig. 392.

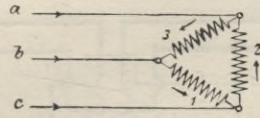


Fig. 393.

Sind die drei Zweige des Arbeitskreises in Sternschaltung angeordnet (siehe Fig. 392), so bestehen folgende Beziehungen zwischen den Spannungen und Stromstärken:

$$\left. \begin{aligned} e_1 - e_2 &= e_c; & e_2 - e_3 &= e_a; & e_3 - e_1 &= e_b; \\ i_1 &= i_a; & i_2 &= i_b; & i_3 &= i_c; \end{aligned} \right\} \quad 14)$$

$$i_a + i_b + i_c = 0; \quad i_1 + i_2 + i_3 = 0.$$

Durch Multiplikation der letzten Gleichung mit e_1 und Subtraktion von der für die Leistung a aufgestellten Gleichung 12) folgt

$$a = i_2 (e_2 - e_1) + i_3 (e_3 - e_1), \quad \dots \quad 15)$$

also mit Rücksicht auf die ersten der Gleichungen

$$a = e_b \cdot i_c - e_c \cdot i_b \quad \dots \quad 16)$$

Für Dreieckschaltung bestehen dagegen (siehe Fig. 393) die Gleichungen:

$$\left. \begin{aligned} i_2 - i_1 &= i_c; & i_3 - i_2 &= i_a; & i_1 - i_3 &= i_b; \\ e_1 &= e_a; & e_2 &= e_b; & e_3 &= e_c; \end{aligned} \right\} \quad 17)$$

$$e_1 + e_2 + e_3 = 0.$$

Multiplizieren wir die letzte Gleichung mit i_1 und subtrahieren sie dann von der für die Momentanleistung a geltenden Gleichung 12), so ergibt sich:

$$a = e_2 (i_2 - i_1) + e_3 (i_3 - i_1) \quad \dots \quad 18)$$

oder im Hinblick auf die ersten Gleichungen 17)

$$a = e_b \cdot i_c - e_c \cdot i_b \quad \dots \quad 19)$$

Es läßt sich demnach in beiden Fällen die in dem Drehstromnetz verbrauchte oder erzeugte Energie A aus zwei einfachen Wechsel-

stromleistungen A_1 und A_2 nach der Gleichung

$$A = A_1 - A_2 \dots \dots \dots 20)$$

zusammensetzen.

Wenn wir effektive Werte einführen und die Phasenverschiebungen berücksichtigen, die zwischen J_1 und E_2 einerseits und zwischen J_2 und E_1 andererseits bestehen, können wir schreiben

$$A = J_1 E_2 \cos (J_1/E_2) - J_2 E_1 \cos (J_2/E_1) \dots \dots 21)$$

Um beide Messungen rasch und bequem nacheinander ausführen zu können, verwendet man die Fig. 394 dargestellte Schaltungsordnung. Durch den Umschalter U_1 wird die Stromspule des Wattmeters in die Stromleitung von J_1 oder J_2 geschaltet, je nachdem man die Verbindungen $b c$, $b_1 c_1$, aa_1 oder ae , $a_1 c_1$, bb_1 herstellt. Gleichzeitig

hiermit werden die Spannungsleitungen so umgelegt, daß die Spannungen E_2 oder E_1 nach der beweglichen Spule des Instrumentes geführt werden. Der in Fig. 395 gesondert dargestellte zweipolige Umschalter besitzt zwischen a und a_1 , sowie zwischen b und b_1 federnde

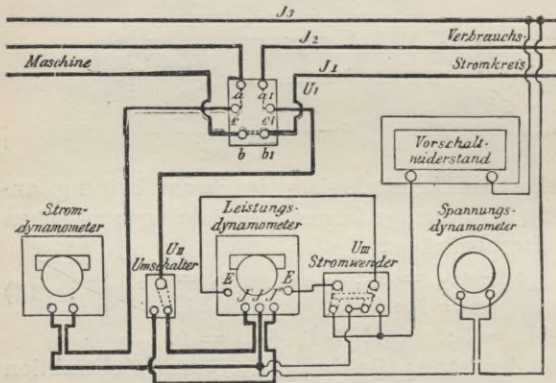


Fig. 394. Schaltung des Wattmeters für Drehstrom.

Kontakte, die a mit a_1 und b mit b_1 so lange direkt verbinden, als die an c und c_1 geschlossenen Schaltebel weder die Kontakte aa_1 noch die Kontakte bb_1 berühren. Bringen wir den Schaltebel etwa auf aa_1 , so wird durch einen Stift die federnde Kurzschluß-Verbindung zwischen a und a_1 gelöst, der Strom kann nicht mehr unmittelbar von a nach a_1 fließen, sondern gelangt jetzt über a und c in die feststehende Wicklung des Wattmeters und verläßt diese über c_1 und a_1 . Es kann somit ohne Stromunterbrechung das Meßgerät bequem in einen beliebigen der beiden Stromkreise gelegt werden. Da hierbei immer nur sehr geringe Potentialdifferenzen ausgeschaltet werden, erfolgt das Umlegen funkenlos.

Wird, wie es in Fig. 394 angedeutet ist, noch ein Strom- und Spannungsdynamometer passend mit der Schaltung verbunden, so ist man jederzeit imstande die beiden Stromstärken und die beiden Spannungen gleichzeitig mit dem Energiemesser abzulesen und erhält

so die zur Bestimmung der beiden Phasenverschiebungen erforderlichen Größen.¹⁾

Durch den Umschalter U_1 werden gleichzeitig auch die Spannungsdrähte entsprechend umgelegt. Schlägt bei beiden Stellungen von U_1 das Wattmeter im richtigen Sinne aus, so hat man die beiden Teilenergien zu addieren, um die im Drehstromnetz vorhandene Gesamtenergie zu erhalten. Bewegt sich jedoch der Zeiger des Wattmeters nach der verkehrten Seite, und muß man, um eine Ablesung an ihm zu ermöglichen, erst den Stromwender U_{III} umlegen, dann sind die beiden Teileleistungen zu subtrahieren.

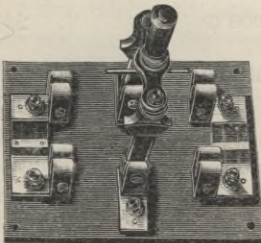


Fig. 395. Umschalter.

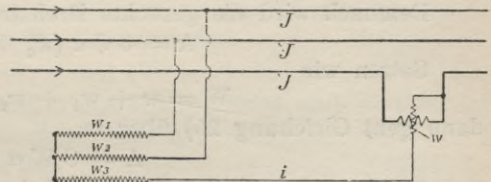


Fig. 396. Schaltung des Wattmeters gleichbelasteter Drehstromkreise.

b) Bei gleich belasteten Zweigen.

Sehr oft tritt der Fall ein, daß alle drei Zweige des Drehstromnetzes gleich belastet sind, z. B. bei reiner Motorenbelastung. Dann genügt zur Ermittlung der jeweiligen Leistung im Drehstromnetz eine einzige Ablesung des Wattmeters, das jetzt mit dem zu untersuchenden Nutzstromkreis nach Fig. 396 verbunden wird. Man schaltet nämlich zu diesem Behufe die Starkstromspule des Wattmeters in eine der Leitungen, verbindet eine der Spannungsklemmen mit der Starkstromwicklung, während die andere an einem induktionsfreien Vorschaltwiderstand w_3 liegt. w_3 endet in einem künstlich gebildeten Nullpunkt, von dem aus zwei weitere induktionsfreie Vorschaltwiderstände w_1 und w_2 zu den beiden anderen Leitungen des Drehstromnetzes führen. Die Widerstände w_1 , w_2 und w_3 sind so bemessen, daß die Beziehung besteht:

$$w_1 = w_2 = w_3 + w,$$

wenn wir unter w den zwischen den Spannungsklemmen des Wattmeters gelegenen Widerstand (z. B. 1000Ω) verstehen. Bedeutet e die Spannung zwischen einer dieser Leitungen und dem Nullpunkt, so ist die Gesamtenergie im Nutzstromkreise

$$A = 3 J e \cdot \cos (J/e) = 3 J e \cdot \cos \varphi, \dots 22)$$

¹⁾ Der Einfluß des höheren Harmonischen einer von der Sinoide wesentlich abweichenden Strom- und Spannungskurve auf die Ergebnisse der Zweiwattmetermethode hat Bloch, ETZ, 1903, S. 993 eingehend untersucht.

wenn wir die durch die Spannungsspule des Energiemessers erzeugte Phasenverschiebung vernachlässigen, was, wie bereits früher bemerkt, fast immer infolge passender Wahl des induktionsfreien Vorschaltwiderstandes geschehen kann.

Das Wattmeter zeigt an:

$$A' = C \alpha = J i \cdot \cos (J/i), \quad 23)$$

wenn i der Strom in seiner beweglichen Spule ist. Lassen wir die zwischen Strom und Spannung in dem Spannungsstromkreise des Wattmeters auftretende Phasenverschiebung unbeachtet, so können wir 23) schreiben:

$$A' = C \alpha = J \cdot \frac{e}{w_3 + w} \cdot \cos \varphi \quad 24)$$

Demnach wird die gesuchte Drehstromleistung

$$A = 3 C \alpha (w_3 + w) \quad 25)$$

Setzen wir

$$W = w + w_1 + w_2 + w_3,$$

dann geht Gleichung 25) über in

$$A = C W \alpha \quad 26)$$

Im Spannungskreise fließt hierbei ein Strom

$$i = \frac{E \sqrt{3}}{W} \quad 27)$$

wenn E die Netzspannung bedeutet.

Ist die Selbstinduktion der beweglichen Wattmeterspule nicht zu vernachlässigen, so hat die Leistung im gleich belasteten Drehstromnetze den Wert

$$A = C \cdot \alpha \cdot W \cdot \frac{\cos \varphi}{\cos \chi \cdot \cos (\varphi - \chi)}, \quad 28)$$

worin φ den Winkel der im Drehstromnetz vorhandenen Phasenverschiebung bedeutet und χ gegeben ist durch die Beziehung:

$$\operatorname{tg} \chi = \frac{4 \pi \sim l}{W} \quad 29)$$

Mit \sim ist die Zahl der Perioden in der Sekunde, mit l der Selbstinduktionskoeffizient der beweglichen Spule des Wattmeters bezeichnet.

Fast immer kann der Winkel $\chi = 0$ gesetzt werden.

Die Leistungsmessungen nach Gleichung 25) sind zulässig bei Bestimmung des Energieverbrauches von Drehstrommotoren.

Zur bequemen Ausführung von Leistungsmessungen in Drehstromkreisen mit gleich belasteten Zweigen liefert die Siemens & Halske A.-G. Vorschaltwiderstände, die so gewickelt sind, daß die Ablesungen des mit einem solchen Vorschaltwiderstande verbundenen Wattmeters mit einer rechnerisch bequemen Zahl (z. B. 5; 10; 20) multipliziert die gesuchte Drehstromleistung ergibt, und zwar ist die

Drehstromkonstante des so benutzten Wattmeters doppelt so groß, als wenn es zum Messen von Gleichstrom oder Einphasenstrom von gleicher Stromstärke und Spannung verwendet worden wäre.

9. Leistungsmessung in Zweiphasenstromkreisen.

Für Zweiphasenstrommessungen gelten ähnliche Berechnungen wie für Drehstrommessungen. Es läßt sich auch hier durch zwei Messungen die Gesamtenergie ermitteln. In Fig. 397 ist die Schaltung unter Benutzung von zwei Wattmetern dargestellt. $J_1 J_1$ ist der Strom in dem einen, $J_2 J_2$ der in dem zweiten Kreis. J ist der Strom in der vereinigten Leitung. Mit einem Energiemesser wird die Energie des Kreises I, mit dem zweiten die des Kreises II gemessen. Die Summe gibt die Gesamtenergie

$$A = C (a_1 + a_2) (W + w) \dots \dots \dots 30)$$

wobei a_1 und a_2 die Ablesungen des Instrumentes und $W + w$ der Gesamtwiderstand des Spannungskreises ist.

Durch Vermittelung eines Umschalters, wie er vorher beschrieben wurde, kann mit einem einzigen Instrument die Gesamtenergie gemessen werden, indem das Meßgerät, genau wie in Fig. 394 für Drehstrombetriebe dargestellt, in die eine oder andere Stromleitung eingeschaltet wird.

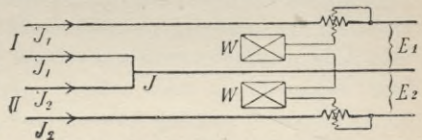


Fig. 397. Schaltung bei Arbeitsmessung in Zweiphasenanlagen.

Sind die Zweige gleich belastet, so genügt es, eine der beiden erwähnten Messungen auszuführen. Die Gesamtenergie ist dann

$$A = 2 C (W + w) a \dots \dots \dots 31)$$

10. Messung von Phasenverschiebungen mittels des Wattmeters.

In Drehstrombetrieben läßt sich das Wattmeter unmittelbar bei gleich belasteten Zweigen zur Messung der Phasenverschiebung benutzen, ohne daß gleichzeitig Strom- und Spannungsmessungen erforderlich wären. Schaltet man das Instrument so um, daß gemessen wird

$$C a_1 = J_1 E_2 \cdot \cos (J_1/E_2)$$

und

$$C a_2 = J_2 E_3 \cdot \cos (J_1/E_3),$$

indem man den Spannungskreis mit dem einen Ende das eine Mal an den Stromkreis von J_2 , das andere Mal an den von J_3 schaltet, wobei J_1, J_2, J_3, E_2, E_3 die in Fig. 392 dargestellten Bedeutungen haben, so ist

$$\left. \begin{aligned} C a_1 &= J_1 E_2 \cdot \cos (\varphi + 30^\circ) \\ C a_2 &= J_1 E_3 \cdot \cos (\varphi + 30^\circ) \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots 32)$$

Für $E_2 = E_3$
ergibt sich hieraus leicht:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{a_1 - a_2}{a_1 + a_2} \cdot \sqrt{3} \dots \dots \dots 33)$$

Die Konstante des Wattmeters fällt heraus, sodaß Fehler in der Aichung des Instrumentes ohne Einfluß auf den Endwert sind.

Auf ein gleiches Ergebnis kommt man, wenn man die beiden Teilleistungen (Gleichung 21) mittels des Wattmeters bestimmt. Sind die den beiden Teilleistungen $J_1 E_2 \cdot \cos (J_1/E_2)$ und $J_2 E_1 \cdot \cos (J_2/E_1)$ entsprechenden Ablesungen am Instrument a_1 und a_2 , so ist ebenfalls

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{a_1 - a_2}{a_1 + a_2} \cdot \sqrt{3}.$$

29. Kapitel.

Messung des Phasenunterschiedes.

1. Phasenmesser der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft.

Während bei dem Gleichstrom nur zwei charakteristische Größen in Betracht zu ziehen sind, Strom und Spannung, deren Produkt die geleistete Arbeit bestimmt, so kommt bei dem Wechselstrom noch eine dritte Größe, der Phasenunterschied zwischen dem Strome und der Spannung hinzu, denn die Arbeit eines Wechselstromes ist das Produkt aus Strom, Spannung und dem Cosinus des Phasenunterschiedes zwischen beiden.

In einer Gleichstromanlage genügen somit für jeden Stromerzeuger zwei Instrumente, um den Betrieb übersehen zu können, ein Ampèremeter und ein Voltmeter; bei einer Wechselstromeinrichtung sind hingegen drei Instrumente erforderlich. Außer dem Stromzeiger und Spannungszeiger muß es noch eine Vorrichtung geben, entweder einen Arbeitsmesser oder ein Instrument, an dem der Phasenunterschied zwischen Strom und Spannung abgelesen werden kann. Apparate, die eine Messung des Phasenunterschiedes gestatten, nennt man Phasenmeter. Welche drei Instrumente man wählt, ist ziemlich gleichgiltig. Der Gebrauch des Phasenmessers bietet jedoch den Vorteil dar, daß man sofort erkennt, ob der Strom der Spannung vorausseilt, also eine positive Phasenverschiebung vorhanden ist, wie dies der Fall sein wird, wenn eine im Stromkreise wirksame Kapazität überwiegt, oder ob der Strom gegen die Spannung verzögert, demnach der Phasenunterschied negativ ist, was dann stattfindet, wenn die im Stromkreise vorhandene Selbstinduktion überwiegt.

Der Chef-Elektriker der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft in Berlin, v. Dolivo-Dobrowolski, hat im Jahre 1894 nach dem Principe der Drehstrommotoren eine Vorrichtung konstruiert, die Größe und Sinn des Phasenunterschiedes zu messen gestattet, und die er Phasenmeter nennt.

Um eine Eisenscheibe (vergl. Fig. 398), die um eine Achse drehbar ist, sind zwei Wicklungen gelegt, sodaß sich in diesen Spulen die Scheibe frei bewegen kann. Die eine dieser Spulen besteht aus wenigen Windungen dicken Drahtes, der vom Hauptstrom durchflossen wird. Unter 90^0 dagegen geneigt, ist eine zweite Spule an-

gebracht, die aus vielen Windungen eines dünnen Drahtes besteht. Außerdem ist dieser Spule noch ein großer induktionsfreier Widerstand vorgeschaltet. Der schwache, in dieser Spule fließende Strom ist alsdann mit der Spannung des Wechselstromes nahezu in gleicher Phase und der Spannung proportional. Diese beiden um 90° gegeneinander geneigten Spulen üben alsdann ein Drehungsmoment D auf die Eisenscheibe aus, das die Größe

$$D = C \cdot J \cdot i_2 \cdot \sin \varphi \dots \dots \dots 1)$$

hat, wenn J die Stromstärke in der dickdrähtigen Stromspule, i_2 die

Stromstärke in der dünndrähtigen Spannungsspule und φ der Phasenunterschied zwischen Strom und Spannung ist. C ist eine von den Abmessungen der Teile des Instrumentes abhängige Konstante.

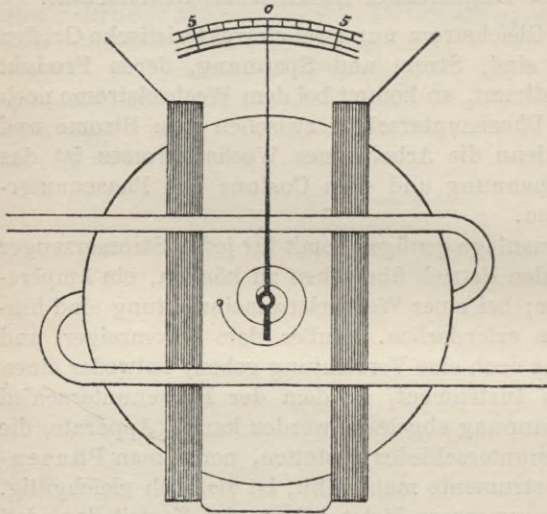


Fig. 398. Phasenmesser der A. E.-G.

in der Phase gegeneinander verschobenen Ströme nicht in dauernde Rotation geraten, sondern nur um einen Winkel gedreht werden, der dem Betrage des Drehungsmomentes D proportional ist.

Wenn der Widerstand der Spannungsspule und ihres induktionsfreien Vorschaltwiderstandes genügend groß ist, so ist der diese Spule durchfließende Strom i_2 der Spannung E proportional. Da nun in einer vorhandenen Anlage während des Betriebes die Spannung E möglichst konstant erhalten wird, so ist:

$$D = K \cdot J \cdot \sin \varphi \dots \dots \dots 2)$$

wo K eine neue Konstante ist.

Das Produkt $J \cdot \sin \varphi$ ist aber, wie das Diagramm (Fig. 399) zeigt, der Leerstrom oder die wattlose Komponente des Stromes.

Das Drehungsmoment, das auf die Eisenscheibe ausgeübt wird, ist somit der auf der Spannung senkrechten Komponente des Stromes direkt proportional.

Mit der Scheibe wird ein Zeiger fest verbunden, der vor einer Skala spielt. An dieser Skala kann man den Betrag des Leerstromes direkt in Ampère ablesen.

Selbstverständlich muß die Skala für jede Wechselzahl, Spannung und Form der Stromkurve besonders empirisch geteilt werden.

Da die Angaben des Instrumentes der Spannung proportional sind, kann eine für eine bestimmte Spannung hergestellte Teilung auch für eine andere Spannung benutzt werden, wenn man die Ausschläge mit dem Verhältnisse der Spannungen multipliziert.

Die Bestimmung des Phasenunterschiedes ist besonders dann von Wichtigkeit, wenn mehrere Maschinen auf dasselbe Verteilungsnetz in Parallelschaltung arbeiten oder sogenannte Synchronmotoren für Arbeitsübertragung auf elektrischem Wege durch Wechsel- oder Drehstrom Verwendung finden sollen.

Bei parallel geschalteten Wechsel- oder Drehstrommaschinen wird die Leistung nur durch die Menge der von der Betriebsdampfmaschine oder von der Turbine an die

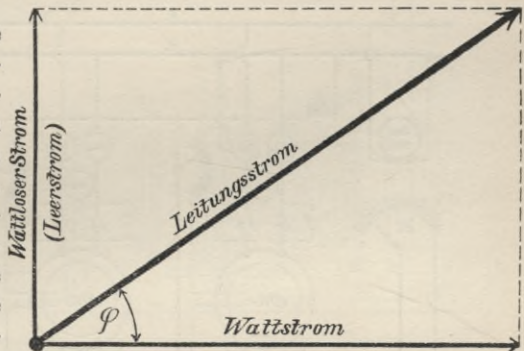


Fig. 399. Zerlegung des Leitungsstromes in die Arbeitskomponente und die wattlose Komponente.

Riemenscheibe der elektrischen Maschine abgegebenen Arbeit geregelt. Ist z. B. diese Maschine zu schwach erregt, gibt sie zu niedrige Spannung, so fließt von den anderen Maschinen ein wattloser Ausgleichsstrom dem Anker dieser Maschine zu, der durch seine Rückwirkung auf das Feld die Spannung auf die erforderliche Höhe bringt. Je nachdem dieser wattlose Strom in seiner Phase um 90° vor der Spannung vorseilt oder um diesen Winkel hinter ihr zurückbleibt, wird das Feld der betreffenden Maschine durch die Ankerrückwirkung verstärkt oder geschwächt. Dieser Ausgleichsstrom wird durch das Phasenmeter gemessen, er bewirkt das, was man früher, ehe man den richtigen Zusammenhang kannte, die synchronisierende Tendenz parallel geschalteter Wechselstrommaschinen nannte.

Ein solcher wattloser Strom belastet nun aber die Ankerdrähte unnützlich und erschwert die Übersicht über die Verteilung der Leistungen auf die einzelnen in Parallelschaltung arbeitenden Maschinen.

Zeigt das Phasenmeter einer Anlage merklich verschiedene Ablenkung, so wird man die Erregung der Wechselstrommaschinen in dem Sinne ändern, daß Unterschiede in den Angaben der Phasenmeter wegfallen.

Ist die Belastung im Verteilungsnetze wesentlich induktionsfrei, so müssen alle Phasenmeter auf null stehen oder um null herum pendeln.

Besteht jedoch die Belastung aus Motoren oder Bogenlampen, ist also im äußeren Widerstande merkliche Selbstinduktion vorhanden, so müssen alle Phasenmeter einen der Stromstärke der betreffenden Maschine proportionalen Ausschlag nach derselben Seite zeigen.

Bei Benutzung von Phasenmessern kann man es durch Änderung der Erregerstromstärke leicht dahin bringen, daß zwischen den parallel geschalteten Maschinen keine Ausgleichsströme fließen.

Die Summe der Ablesungen an den Ampèremetern der einzelnen Maschinen zeigt dann den Stromverbrauch im Netze an.

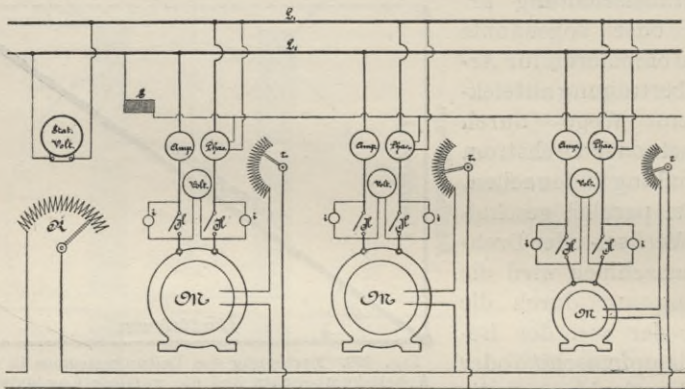


Fig. 400. Gebrauch der Phasenmesser bei parallel geschalteten Wechselstrommaschinen.

Die obenstehende Skizze (Fig. 400) stellt die Verbindung parallel geschalteter Wechselstrommaschinen M, M, M mit den Sammelschienen $L_1, L_2,$ mit den je drei Meßinstrumenten jeder Maschine: Ampèremeter,¹⁾ Voltmeter, Phasenmesser, und mit den Regulierwiderständen r, r, r und R für den Erregerstrom dar.

H, H sind die Hauptauschalter jeder Maschine, i, i sind die sogenannten Phasenlampen, von denen wir späterhin reden werden. Außerdem ist noch ein Stationsvoltmeter und für die Spulen der Phasenmesser ein gemeinsamer Vorschaltwiderstand s vorgesehen.

Um auch bei dem Auftreten starker Selbstinduktion in dem Verteilungsnetze alle Phasenmesser gleichzeitig auf null bringen zu können, empfiehlt es sich die Vorschaltspule s so einzurichten, daß man ihr einen einstellbaren Betrag von Selbstinduktion geben kann.

¹⁾ Um die Belastung der einzelnen Maschinen leicht übersehen zu können, empfiehlt es sich, das Ampèremeter durch ein Wattmeter zu ersetzen.

2. Phasenmesser von Hartmann & Braun.

Auf anderen Prinzipien beruhend, hat die Firma Hartmann & Braun einen Phasenmesser konstruiert,¹⁾ dessen Zeiger unmittelbar den Winkel der Phasenverschiebung angibt. Durch zwei vom Hauptstrome durchflossene Spulen CC (vergl. Fig. 401) wird ein nahezu homogenes magnetisches Wechselfeld erzeugt. Zwischen denselben befinden sich zwei um 90° versetzte Spulen, die, miteinander verbunden, um eine zur Richtung der Kraftlinien senkrechte Achse drehbar sind.

Der einen dieser beiden Spulen A wird unter Vorschaltung eines hohen induktionsfreien Widerstandes Wechselstrom zugeführt. Dieser Strom ist dann der Spannung proportional und mit der Spannung in Phase. Der Spule B wird dagegen ein Strom zugeführt, der gegen die Spannung um 90° verschoben ist.

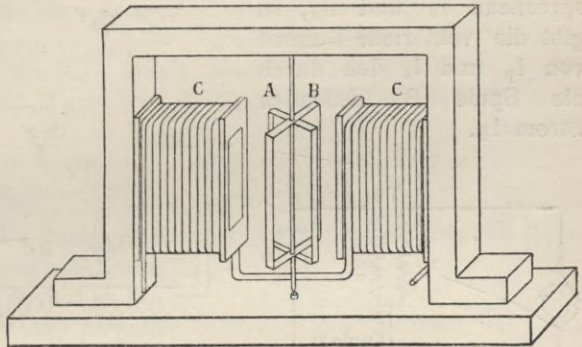


Fig. 401. Phasenmesser von Hartmann & Braun.

Ist der Winkel zwischen der festen Spule C und der beweglichen Spule gleich α und die zu messende Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung gleich φ , so ist das Drehmoment D_A , welches auf die Spule A ausgeübt wird:

$$D_A = \mathfrak{H}_C \cdot \mathfrak{H}_A \cdot \sin \alpha \cdot \cos \varphi \quad 3)$$

wenn \mathfrak{H}_C das von C und \mathfrak{H}_A das von der Spule A erzeugte Feld ist.

Auf die Spule B wird ein Drehungsmoment D_B ausgeübt von der Größe:

$$D_B = \mathfrak{H}_C \cdot \mathfrak{H}_B \cdot \sin (\alpha + 90^\circ) \cdot \cos (\varphi \pm 90^\circ) \quad . . . 4)$$

Hierin ist \mathfrak{H}_B das Feld der Spule B.

Macht man außerdem $\mathfrak{H}_B = \mathfrak{H}_A$, so findet Gleichgewicht statt, wenn $D_A + D_B = 0$ oder

$$\mathfrak{H}_C \cdot \mathfrak{H}_A [\sin \alpha \cdot \cos \varphi + \sin (\alpha + 90^\circ) \cdot \cos (\varphi \pm 90^\circ)] = 0$$

ist.

Hieraus folgt:

$$\tan \alpha = \pm \tan \varphi \quad 5)$$

Je nachdem der Strom in Spule A dem Strom in B um eine

¹⁾ D. R.-P. No. 96 039 und No. 108 602.

Viertelperiode vor- oder nachteilt, hat man das positive oder negative Vorzeichen zu benutzen und erhält:

im ersten Falle $\varphi = a$ oder $\varphi = 180 + a$

im zweiten Falle $\varphi = -a$ oder $\varphi = -180 - a$ oder auch $180^\circ - a$.

Benutzt man eine Skala, die nur bis 180° geht, so kommen zwei Werte nicht in Betracht.

Um eine Phasenverschiebung der beiden Ströme um 90° zu erzielen, benutzen Hartmann & Braun einen kleinen Transformator T und einen induktionsfreien Widerstand W (Fig. 402).

Hat der Transformator in der primären Wickelung die Stromstärke i_p und die Windungszahl n_p und im sekundären Teile entsprechend i_s und n_s , so gibt die vektorielle Summe von i_p und i_s den durch die Spule B fließenden Strom i_B .

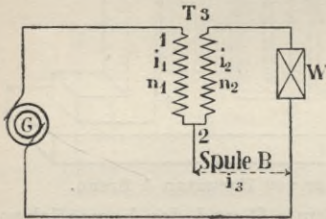


Fig. 402. Schaltung des Phasenmessers.

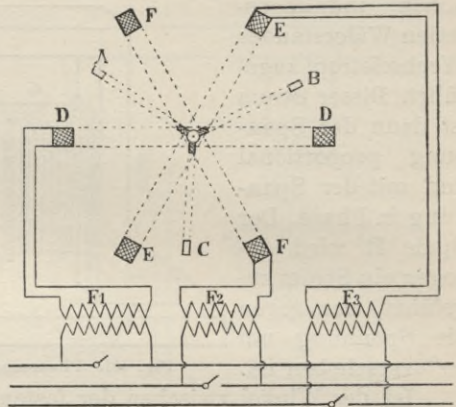


Fig. 403. Drehstromphasenmesser von Punga.

Durch passende Wahl von n_p und n_s kann man der Phasenverschiebung zwischen i_p und i_B jeden beliebigen Wert zwischen 0 und 180° geben. Die Größe i_s kann man durch Änderung von W regeln.

3. Phasenmesser für Drehstrom von Punga.

Der Nachteil des soeben beschriebenen Apparates liegt darin, daß man genötigt ist durch Anwendung einer Selbstinduktion eine Hilfsphase zu erzeugen, diese aber hängt dann von der Periodenzahl ab.

Dieser Übelstand ist vermieden bei dem Drehstrom-Phasenmesser von Franklin Punga.¹⁾

Der bewegliche Teil besteht aus drei um 120° gegeneinander versetzten Spulen A, B, C. Anstatt zweier Stromspulen bei dem beschriebenen Phasenmesser werden deren drei verwendet D, E, F, die ebenfalls um 120° gegeneinander versetzt sind. Die beweglichen

¹⁾ Helios, Export-Zeitschrift für Elektrotechnik 1902, Heft 32.

Spannungsspulen A, B, C erhalten immer unter Vorschaltung induktionsfreien Widerstandes Strom von den Klemmen des Dreiphasengenerators. (Diese Anschlüsse sind in Fig. 403 nicht mitgezeichnet.) Die inneren Enden der Spulenwickelungen sind miteinander verbunden.

Die Stromspulen D, E, F können nun einzeln oder zusammen angeschlossen werden. Man mißt dann entweder die Verschiebung eines Phasenstromes oder die mittlere Verschiebung φ der drei Phasenströme zusammen, die den Leistungsfaktor $\cos \varphi$ bestimmt.

Die drei Drehungsmomente D_A, D_B, D_C , welche die Spule D auf die beweglichen Wickelungen A, B, C ausübt, sind:

$$\left. \begin{aligned} D_A &= \mathfrak{H}_A \cdot \mathfrak{H}_D = \sin a \cdot \cos \varphi \\ D_B &= \mathfrak{H}_B \cdot \mathfrak{H}_D \cdot \sin(a + 120^\circ) \cdot \cos(\varphi + 120^\circ) \\ D_C &= \mathfrak{H}_C \cdot \mathfrak{H}_D \cdot \sin(a + 240^\circ) \cdot \cos(\varphi + 240^\circ) \end{aligned} \right\} \dots 6)$$

Man macht $\mathfrak{H}_A = \mathfrak{H}_B = \mathfrak{H}_C$. Es findet Gleichgewicht statt, wenn

$$D_A + D_B + D_C = 0,$$

d. h.
$$\sin a \cdot \cos \varphi + \sin(a + 120^\circ) \cdot \cos(\varphi + 120^\circ) + \sin(a + 240^\circ) \cdot \cos(\varphi + 240^\circ) = 0$$

ist.

Rechnet man dies durch Auflösung der Klammern aus, so ergibt sich als Gleichgewichtsbedingung:

$$\tan a = \tan \varphi \quad a = \varphi \dots 7)$$

Der Winkel, um den sich das Spulensystem verdreht, ist somit gleich der Phasenverschiebung.¹⁾

4. Messung des wattlosen Stromes.

Man kann die Phasenverschiebung auch dadurch messen, daß man den effektiven Strom und außerdem die wattlose Komponente des Stromes mißt. Letzteres kann in sehr einfacher Weise nach einem von Bragstadt und la Cour angegebenen Verfahren geschehen.

In eine der beiden Hauptleitungen L_1 und L_2 (vergl. Fig. 404) schaltet man einen induktionsfreien bekannten Widerstand w ein. Ein parallel zu demselben geschaltetes Voltmeter mit Ampèreskala \mathfrak{A}_1 dient zur Messung des totalen Stromes J .

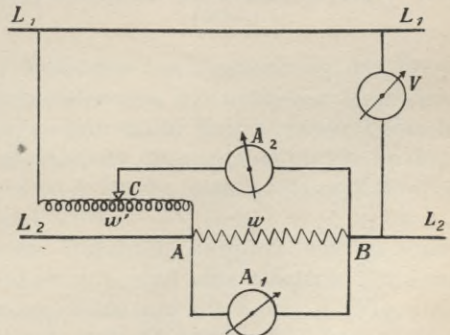


Fig. 404. Messung des wattlosen Stromes nach Bragstadt und la Cour.

¹⁾ Diese Drehstrom-Phasenmesser bauen Everett, Edgumbe & Co. in London.

In Nebenschluß zu den Leitungen L_1 und L_2 wird ein Widerstand w' gelegt, der sowohl Ohmschen als induktiven Widerstand enthalten kann. Parallel zu w' liegt ein Voltmeter V , mit dem man die Spannung E bestimmt.

Zwischen einem einstellbaren Punkt c des Widerstandes w' und dem Punkt B der Leitung L_2 liegt ein Voltmeter mit Ampèreskala \mathcal{A}_2 , an dem man die Stärke des wattlosen Stromes mißt.

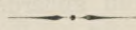
Die Richtigkeit der Meßanordnung zeigt nebenstehendes Diagramm. (Fig. 405.)

Der Vektor \overline{AE} gibt die Richtung der Spannung E an und \overline{AJ} diejenige des effektiven Stromes J . $\overline{AB} = J \cdot w$ ist in Phase mit dem Strome und stellt den Spannungsunterschied zwischen den Punkten A und B dar. Der Ausschlag des Voltmeters \mathcal{A}_1 wird somit der Stromstärke J proportional sein.

Fig. 405. Spannungsdiagramm zur Messung wattloser Ströme.

Stellt man nun den verschiebbaren Kontakt c so ein, daß der Ausschlag im Voltmeter \mathcal{A}_2 ein Minimum wird, so ist dieser Minimalausschlag der wattlosen Komponente $J \cdot \sin \varphi$ proportional.

Die beiden als Strommesser verwendeten Voltmeter \mathcal{A}_1 und \mathcal{A}_2 müssen selbstverständlich sehr genau übereinstimmend nach Stromstärke graduiert sein.



30. Kapitel.

Die Bestimmung der Formen der Wechselstromkurven.

1. Prinzipien der angewendeten Methoden.

Für eine große Zahl von Aufgaben der Wechselstromtechnik ist es von Wichtigkeit die Form der Kurven zu kennen, durch die der zeitliche Verlauf der Ströme und Spannungen graphisch dargestellt wird; besonders häufig hat man das Bedürfnis die Abweichungen von der Gestalt der Sinoide, sowie das Auftreten stärkerer Nebenwellen mit höheren Wechselzahlen kennen zu lernen.

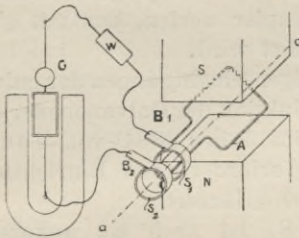


Fig. 406. Erläuterung des Prinzips der Kurvenzeichner nach optischer Methode.

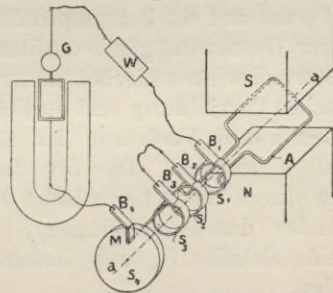


Fig. 407. Kurvenzeichner nach Joubert.

Es gibt zwei Gruppen von Methoden zur Feststellung der Form der Schwingungskurve des Wechselstromes, die optischen Methoden, durch welche die Gestalt der Kurve mit einem Male sichtbar gemacht wird, und die Methode der successiven Momentankontakte an verschiedenen Stellen der Kurve, durch welche eine größere Zahl von Punkten auf der Kurve bestimmt wird.

Zur Erläuterung der beiden Verfahren knüpfen wir an einen bekannten Vorgang an und denken uns, daß eine einzelne Windung in einem homogenen magnetischen Felde um die Achse a (Fig. 406) mit gleichförmiger Geschwindigkeit gedreht wird. Die Dauer einer Periode des Vorganges fällt dann mit der Dauer einer Umdrehung der Windung zusammen, und die in der Windung induzierte EMK ist in jedem Augenblicke dem Sinus des Winkels proportional, unter dem die Ebene der Windung die Kraftlinienrichtung schneidet.

Die beiden Schleifringe S_1 und S_2 , an welche die Enden der Windung angeschlossen sind, stehen durch die Schleiffedern B_1 und B_2 mit dem beweglichen Rahmen eines Deprez-d'Arsonval-Galvanometers (vergl. Gleichstromtechnik, Kap. VI, 16., S. 152) in Verbindung. Die Ausschläge der Galvanometerspule werden dann, von Störungen abgesehen, in jedem Augenblicke der in der Windung induzierten EMK proportional sein. Wirft man auf den mit dem beweglichen Teile des Galvanometers verbundenen Spiegel einen Lichtstrahl, so werden dessen Ablenkungen aus der Ruhelage den EM Kräften proportional sein.

Um nun gleichzeitig dem Lichtstrahl eine zu diesen Ausschlägen proportionale Abszissenbewegung zu geben, läßt man den Lichtstrahl auf einen zweiten Spiegel oder ein System von Spiegeln fallen, das mit dem Leiter synchron rotiert. Der zweimal reflektierte Lichtstrahl erzeugt dann auf einem Schirme eine leuchtende Kurve, die auf photographischem Wege oder sonstwie fixiert werden kann.

Selbstverständlich kann man den vom ersten Spiegel reflektierten Strahl auch auf ein lichtempfindliches Papier werfen, das mit gleichförmiger Geschwindigkeit vorüber geführt wird.

Störend wirken hierbei immer die Eigenschwingungen der galvanometrischen Vorrichtung und die Selbstinduktion der Galvanometerspule.

Das zweite Verfahren ist schon im Jahre 1881 von Joubert angegeben worden. Die für dasselbe erforderlichen Einrichtungen werden durch die schematische Fig. 407 erläutert.

Außer den Schleifringen S_1 und S_2 ist noch ein weiterer S_3 und eine Scheibe S_4 aus isolierendem Materiale auf der Achse aa befestigt.

Auf dem Umfange von S_4 befindet sich ein kleines Metallsegment M . Letzteres steht durch einen Draht in Verbindung mit dem Schleifringe S_3 . Wird nun die Wechselfspannung der Bürsten B_1 und B_2 mit den Bürsten B_3 und B_4 zu einem Stromkreis verbunden, in welchem sich außerdem ein Spiegelgalvanometer (oder Elektrometer) G und ein Widerstand W befindet, so tritt ein Strom in dem Kreise nur in dem kurzen Augenblicke auf, in welchem das Segment M die Bürste B_4 berührt. Solange die Stellung der Bürste B_4 fest ist, tritt dieser Stromschluß bei jeder Umdrehung nur einmal und stets bei derselben relativen Stellung des Leiters A zu den Kraftlinien auf, stets also wenn dieselbe EMK herrscht. Bei jeder Umdrehung erfolgt daher ein kurzer Stromstoß von gleicher Größe durch das Galvanometer bzw. Elektrometer. Ist die Schwingungsdauer desselben größer als das Intervall zwischen zwei Stromstößen, so bringen die einzelnen Stromstöße einen konstanten Ausschlag hervor, dessen Größe proportional der herrschenden EMK ist. Bringt man

die Bürste B_4 in eine andere Stellung, so tritt der Stromschluß zu einer anderen Zeit bei einer anderen Stellung des Leiters A zu den Kraftlinien auf, wenn also eine andere EMK herrscht; das Galvanometer bzw. Elektrometer gibt dann wiederum einen diesem Werte proportionalen Ausschlag. Die Bürstenstellung B_4 entspricht stets einer ganz bestimmten Phase im zeitlichen Verlaufe der EMK, und durch allmähliche Verdrehung der Bürste B_4 läßt sich dieselbe nach und nach in sämtliche Phasenstellungen bringen. Man wiederholt die Beobachtung an so vielen Punkten, daß man die Stromkurve bequem zusammenziehen kann.

Man muß ein empfindliches Galvanometer verwenden und diesem einen hohen Widerstand W vorschalten. Um die Schwingungen zu dämpfen, legt man zum Galvanometer G noch einen Widerstand R in Nebenschluß.

Um von Unsicherheiten der Momentankontakte unabhängig zu werden, empfiehlt es sich, einen Kondensator C (Fig. 408) dem Widerstande W und Galvanometer G parallel zu schalten.

Den Punkten A und B wird die zu messende Wechselspannung zugeführt. Dadurch, daß man den Abstand der beiden Bürsten J ändert, kann man die Dauer des Stromschlusses beliebig verändern.

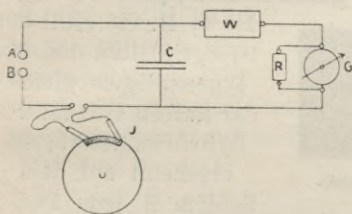


Fig. 408. Schaltung bei Anwendung der Joubertschen Methode der Kurvenaufnahme.

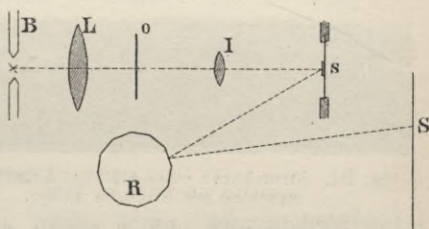


Fig. 409. Anordnung des Frölich'schen Apparates zur Bestimmung der Kurvenform der Wechselströme.

2. Die optische Methode von Oskar Frölich (1887).

Diese Methode gehört der ersten Gruppe an. Sie benutzt die aus den Grundlagen des Fernsprechwesens bekannte Tatsache, daß eine Telephonmembran die Eigenschaft besitzt, sich fast vollständig mit ihren Schwingungen dem zeitlichen Verlauf rasch wechselnder Ströme anzupassen, ohne durch Eigenschwingungen die Gestalt der Kurven erheblich zu verändern.

Man sendet daher durch einige Windungen, die sich hinter der Membran eines Telefons befinden, den zu untersuchenden Wechselstrom oder einen Bruchteil desselben und macht die Schwingungen der Telephonmembran sichtbar.

Um diesen Zweck zu erreichen, befestigt Frölich zwischen der Mitte der Membran und deren Rand einen kleinen Spiegel, läßt auf diesen Spiegel den kräftigen Lichtstrahl eines Projektionsapparates fallen und zerlegt die Schwingungen durch einen rotierenden Spiegel.

Fig. 409 zeigt die Anordnung des Apparates.

Das Licht einer Gleichstrombogenlampe B wird durch eine Kondenserlinse L konzentriert und auf die feine punktförmige Öffnung o eines Schirmes geworfen. Von dieser hell erleuchteten Öffnung o entwirft die Projektionslinse l auf dem Strahlenwege l s R S ein reelles Bild auf dem Schirm oder der photographischen Platte S.



Fig. 410. Stromkurve einer kleinen Wechselstrommaschine ohne Eisen im Anker.

Wechselstrom betriebenen kleinen Synchronmotor in rasche Umdrehungen versetzt wird. Die Schwingungszahl der Telephonmembran und die Umdrehungszahl des rotierenden Spiegels stehen somit in einem Verhältnis zueinander, das durch eine ganze Zahl ausgedrückt wird.



Fig. 411. Stromkurve einer kleinen Wechselstrommaschine mit Eisen im Anker.

Der Spiegel s ist auf der Telephonmembran aufgekittet. R ist ein sehr genau gearbeitetes Spiegelpolygon, das durch einen von dem zu messenden

Ist z. B. die Zahl der Spiegelplatten des Polygonspiegels gleich der halben Polzahl des Synchronmotors, so erscheint auf dem Schirm S jede Phase

jeder Schwingung immer genau an derselben Stelle. Man erhält daher ein ruhig stehendes Bild der Schwingungskurve, welches entweder unmittelbar beobachtet oder durch eine photographische Platte aufgenommen werden kann. Für das Gelingen des Versuches ist es von besonderer Bedeutung, daß die Ebenen der Polygonspiegel genau der Drehachse parallel sind und untereinander genau gleiche Winkel einschließen. Dies läßt sich aber leicht erreichen, wenn die Spiegel mit dem prismatischen Körper, der sie trägt, durch je drei Stellschrauben verbunden werden.

Die vorstehenden Figuren sind Abbildungen der Kurven von Wechselstrommaschinen. Fig. 410 bezieht sich auf eine kleine Wechselstrommaschine älterer Konstruktion mit Scheibenanker von Siemens & Halske, ohne Eisen im Anker. Fig. 411 zeigt die Stromkurve derselben Maschine mit Eisen im Anker. Man erkennt sofort, daß im zweiten Falle der Charakter der reinen Sinoide durch

das Hinzutreten einer zweiten Welle von doppelter Periodenzahl und kleinerer Amplitude verändert wird.

Ganz besonders wertvoll aber erscheint der Umstand, daß man nach dieser Methode auch Phasenverschiebungen bei elektrischen Vorgängen sichtbar machen und messen kann.

Um dieselben zur Erscheinung zu bringen, bringt man vor den Schirm oder vor die Kassette, in der sich die photographische Platte befindet, einen vertikalen Draht. Man stellt z. B. die Marke genau auf die Kuppe des Wellenberges ein und schaltet dann in den Stromkreis die Vorrichtungen ein, die eine Phasenänderung hervorrufen.

So zeigt z. B. Fig. 412a die Stromkurve eines Wechselstromes, ehe er in ein Kabel eintritt; dabei ist die



Fig. 412 a. Wechselstromkurve vor einem Kabel.

Marke auf die Höhe des Wellenberges eingestellt. Die daneben stehende Kurve (Fig. 412b) zeigt denselben Strom hinter dem Kabel. Die Phasendifferenz beträgt etwa 64° ; auch hat die Amplitude des Wechselstromes merklich abgenommen.



Fig. 412 b. Wechselstromkurve nach Einschaltung eines Kabels.

3. Der Oszillograph¹⁾

Zuerst hat Blondel darauf hingewiesen, daß die magnetische Anziehung und Abstoßung, die ein von einem Wechselstrom durchflossener biegsamer Leiter in einem gleichförmigen Kraftlinienfelde erfährt, benutzt werden kann, um auf optischem Wege die Kurvenform dieses Wechselstromes sichtbar zu machen.

Zwischen den Polen eines kräftigen Elektromagneten mit zugeschärften Polenden läuft über eine Rolle ein dünnes biegsames Metallband oder ein hartgezogener Silberdraht. (Fig. 413.) Durch die Klemme kk' führt man den

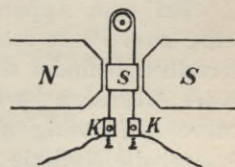


Fig. 413. Erläuterung der Einrichtung des Oszillographen.

zu untersuchenden Wechselstrom hin und zurück. Infolge der elektromagnetischen Wirkung wird dann der eine Draht nach vorn,

¹⁾ Näheres über die praktische Ausführung dieses Apparates findet man im Journal of the Institution of electrical engineers, Bd. XXVIII, (1899).

der andere gleichzeitig nach hinten abgelenkt; ein an beiden Drähten gleichzeitig befestigter, sehr leichter Spiegel s wird dadurch um eine den Drähten parallele Achse gedreht. Die kleinen Winkel, um welche diese Drehungen erfolgen, werden der Stärke des die Drähte durchfließenden Stromes sehr nahe proportional sein. Ist nun die Dauer der Eigenschwingung des Leiters genügend klein (sie beträgt bei den neuen Apparaten dieser Art 0,0001 Sekunde), und sind diese Schwingungen sehr stark gedämpft, so werden die Schwingungen des Spiegels genau der Kurvenform des Wechselstromes folgen.

Eine ausreichende Dämpfung erzielt man z. B. dadurch, daß man diesen ganzen Teil des Apparates in ein Gefäß einbettet, welches mit völlig klarem Öl gefüllt ist. Dem Spiegel gegenüber ist dieses Gefäß durch eine planparallele Glasplatte oder eine Linse abgedichtet.

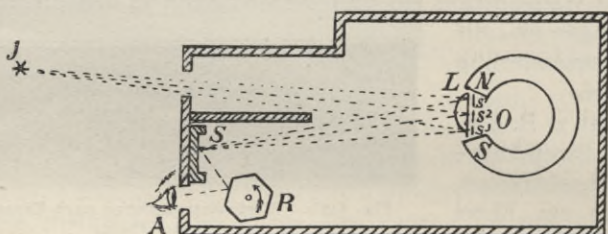


Fig. 414. Oszillograph von Dudell & Marchant.

Um die Bewegungen des Spiegels s sichtbar zu machen, wirft man auf denselben einen hellen Lichtstrahl und läßt denselben nach der Reflexion auf einen weißen Schirm fallen. Betrachtet man dieses Bild in einem rotierenden Spiegel, so wird man dort die Kurvenform des Wechselstromes sehen können. Um die Kurvenform dauernd fest zu halten, werden die Bewegungen des Lichtstrahles auf einer rasch vorübergleitenden photographischen Platte fest gehalten.

Bei dem Apparate von Dudell & Marchant werden gleichzeitig zwei Paare solcher beweglichen Metallstreifen verwendet. Jedes derselben befindet sich in einem besonderen Hohlraum im Magnetfelde. Dadurch ist es möglich die Spannungskurve und die Stromkurve gleichzeitig aufzunehmen, während ein dritter feststehender Spiegel die Nulllinie zeichnet.

Die obenstehende Skizze (Fig. 414) erläutert die Einrichtung des Apparates. O ist der Oszillograph mit den drei Spiegeln s_1 , s_2 , s_3 . L ist die Linse, durch welche die von J kommenden Strahlen einer Bogenlampe auf den Schirm S geworfen werden, nachdem sie an den Spiegeln s_1 , s_2 , s_3 reflektiert worden sind. R ist der von einem Synchronmotor bewegte, rotierende Spiegel und A das Auge, welches die Kurven beobachtet.

Der Oszillograph hat den großen Vorzug, daß durch den aufnehmenden Apparat keine merkliche Selbstinduktion in den Stromkreis gebracht wird. Als ein Nachteil muß es angesehen werden, daß, um Kurven von erheblicher Ausdehnung zu erhalten, eine ziemliche Stärke des zur Messung verwendeten Stromes (0,5 Ampère) nötig ist, während bei dem vorher beschriebenen Frölich'schen Apparat sehr viel schwächere Ströme zur Beobachtung verwendet werden können.

Neuerdings hat A. Wehnelt¹⁾ einen wesentlich vereinfachten Oszillographen beschrieben, der auf demselben Prinzipie beruht, aber keine Öldämpfung besitzt. Die Schwingungsdauer des Spiegels beträgt 0,003 Sekunde. Für praktische Zwecke dürfte auch diese wenig kostspielige Vorrichtung zumeist vollständig genügen.

4. Weinhold's Kurvenzeichner unter Anwendung der Braunschen Röhre.

Eine sehr zweckmäßige Einrichtung zur photographischen Aufnahme von Wechselstromkurven hat Weinhold²⁾ angegeben. Er benutzt dazu eine Braunsche Röhre,³⁾ deren Strahlen auf einen Lumineszenzschirm fallen. Die Richtung dieser Strahlen wird bekanntlich durch einen Magneten abgelenkt. Die Ablenkung erfolgt bei dieser Vorrichtung aber durch die magnetische Wirkung eines horizontal gerichteten Wechselfeldes, welches durch zwei zu beiden Seiten der Braunschen Röhre angebrachte Spulen mit vertikaler Windungsebene hervorgebracht wird. Durch diese Spulen sendet man den zu prüfenden Wechselstrom. Die Ablenkung der Kathodenstrahlen erfolgt dann in vertikaler Richtung.

Das Bild des Fleckes wird durch ein photographisches Objektiv auf einen lichtempfindlichen Streifen (Film) geworfen, der durch einen von dem zu untersuchenden Wechselstrom

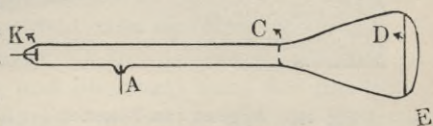


Fig. 415. Braunsche Röhre.

durchflossenen, äußerst einfachen Synchronmotor in Umdrehungen versetzt wird. Die Bilder erscheinen dann auf dem Film stets an der-

¹⁾ Verhandlungen der Deutschen phys. Gesellschaft, Bd. V, 1903, S. 178.

²⁾ ETZ 1901, S. 409, der auch die folgenden Figuren entnommen sind. Ein ähnliches Verfahren hat Seefehlner in der Zeitschrift für Elektrotechnik, Wien 1900 beschrieben.

³⁾ In einer Röhre mit hohem Vakuum wird durch einen Metallschirm C (Fig. 415), der ein Loch besitzt, nur ein dünnes Bündel sogenannter Kathodenstrahlen hindurch gelassen. Dieses Bündel von K ausgehender Strahlen fällt auf einen mit lumineszierender Substanz (CaWO_4) dünn beschriebenen Schirm aus Glimmer oder Glas ED und erzeugt dort einen hellen Lumineszenzfleck. Das Kathodenstrahlenbündel und damit der Lumineszenzfleck erfahren durch eine stromdurchflossene Spule, deren Achse zur Röhre senkrecht ist, eine Ab-

selben Stelle. Die Expositionszeit dauert bei Anwendung eines Objektivs von etwa 50 mm Öffnung bei mäßiger Erregung der Braunschen Röhre durch eine kräftige Influenzelektriermaschine wenige Minuten.

Die in zwei Kugellagern laufende Achse des Apparates (vergl. Fig. 416) trägt dicht über dem Ankerkreuz des Motors einen ebenen, runden Spiegel *b*, der mit der Achse einen Winkel von rund 88° bildet. Mit ihrem oberen Ende ragt die Achse in eine rechteckige Camera hinein; auf diesen Teil der Achse wird ein Holzzylinder aufgesteckt. Auf den Zylinder wird ein Filmstreifen gewickelt und am

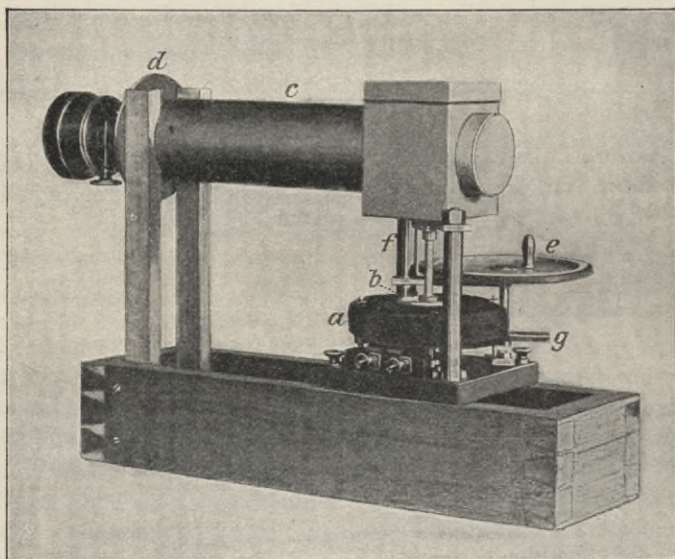


Fig. 416. Apparat zum Zeichnen der Stromkurven nach Weinhold.

oberen und unteren Rande durch kleine umgelegte Kautschukringe befestigt. Die Camera hat oben einen viereckigen Deckel, an der Rückseite einen kurzen zylindrischen Stutzen mit abnehmbarem Deckel, nach vorn einen längeren Stutzen, der in ein zylindrisches Rohr *c* paßt, dessen vorderes Ende an der Objektivfassung *d* befestigt ist.

In die viereckige Camera läßt sich nach Abnahme des oberen Deckels eine Mattscheibe in solcher Stellung einschieben, daß ihre matte Fläche gerade den Holzzylinder tangieren würde, wenn dieser

lenkung, die der Stärke des Magnetfeldes proportional ist. (Vergl. Braun, Wiedemanns Annalen 60 (1897), S. 552 und ETZ 1898, S. 204). Den Lichtpunkt und seine Ablenkung auf dem Schirm ED kann man durch die Glaswand E beobachten.

dabei an seinem Platze wäre; vor die Mattscheibe läßt sich noch eine Metallplatte mit einem vertikalen, etwa 5 mm breiten Schlitz schieben, die zur Abhaltung des Lichtes der weißen Fläche des Lumineszenzschirmes dient; die Mitte der Höhe dieses Schlitzes und des Holzzylinders ist durch einen schwarzen Querstrich auf der Mattscheibe markiert.

Die horizontale Kreisscheibe e trägt am Umfange in einer flachen Nut einen Kautschukring; sie läßt sich mittels einer Kurbel um ihre Achse drehen. Drückt man das freie Ende g dieses Armes mit der Linken leicht nach links, während man mit der Rechten die Kurbel bewegt, so legt sich der Kautschukring gegen die Achse der Vorrichtung und versetzt sie in Drehung. Soll der Apparat benutzt werden, so stellt man ihn so auf, daß seine optische Achse in die Verlängerung der Achse der Braunschen Röhre fällt, und stellt das Objektiv derart ein, daß ein scharfes Bild des Schirmes auf der

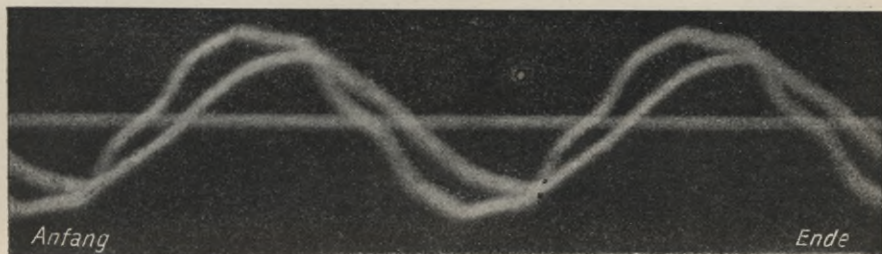


Fig. 417. Wechselstromkurven mit Weinholds Apparat aufgenommen.

Mattscheibe entsteht; dabei dient der kurze, zylindrische Stutzen der Camera als Schauloch. Nun schiebt man die Metallplatte mit dem Schlitz vor die Mattscheibe, erregt die Braunsche Röhre noch ohne Einwirkung eines Magnetfeldes und überzeugt sich, daß das Bild des ruhenden Lumineszenzfleckes durch den Schlitz auf die Mattscheibe in der Höhe des schwarzen Querstriches fällt.

Nun entfernt man die Mattscheibe, schließt den Deckel des Schauloches und des Objektivs, verdunkelt das Zimmer, setzt den Holzzylinder mit dem Film ein und schließt den oberen Deckel der Camera. Ob der Motor synchron läuft, erkennt man, wenn man das Auge nahe an den Spiegel b bringt und im Spiegel nach dem Lumineszenzschirm hinblickt. Läßt man auf die Braunsche Röhre das vertikale Wechselmagnetfeld eines horizontalen Spulenpaares wirken, so erblickt man im Spiegel eine Kurve, die bei synchroner Bewegung des Motors stillsteht.

Sobald der Synchronismus eingetreten ist, läßt man auf die Braunsche Röhre das mittels eines vertikalen Spulenpaares erzeugte,

horizontale Wechsellmagnetfeld wirken und öffnet nun den Objektivdeckel.

Fig. 417 zeigt ein so erhaltenes Diagramm des Wechselstromes aus dem Dreiphasennetz des städtischen Elektrizitätswerkes Chemnitz. Die Kurve mit der kleineren Amplitude und der Phasenverzögerung ist erhalten durch Einschieben eines geblättern Eisenkernes in die schon vorher vom Strom durchflossene Spule. Das Diagramm ist aufgenommen an einem Werkstage bei völliger Tageshelle, also bei stark mit Motoren belastetem Netze; demgemäß sind die Ströme höherer Ordnung nur mäßig, in der gedrosselten Kurve sogar nur noch sehr schwach zu erkennen.

Mehrfach ist diesen optischen Methoden der Vorwurf gemacht worden, daß sie mehr für das Laboratorium, als für die Praxis geeignet seien. Tatsächlich sind dieselben jedoch auch in den Meßzimmern verschiedener Wechsel- und Drehstromzentralen mit bestem Erfolge in Anwendung.

5. Methode von Drexler mit Abänderungen von Behn-Eschenburg.

Mit außerordentlich einfachen Hilfsmitteln, wie sie sich in jeder Wechselstromanlage beschaffen lassen, kann die punktweise Aufnahme der Wechselstromkurven nach dieser Methode erfolgen.

Dieselbe beruht auf dem von Joubert herrührenden Gedanken, daß man auf der Welle der zu untersuchenden Maschine und auf einer mit einem geringen Tourenunterschied laufenden Welle zwei Schneiden anbringt, die, wenn sie aneinander vorübergehen, eine Verbindung nach einem Galvanometer oder einem Spannungsmesser oder nach den Belegen eines Kondensators herstellen, der sich dann mit einem Stromstoß durch das Galvanometer entladet. Als Galvanometer verwendet man ein stark gedämpftes Deprez-d'Arsonval-Galvanometer von hoher Empfindlichkeit. Nehmen wir an, der Unterschied der Umlaufszahlen der beiden Wellen betrage 10 in einer Minute, und das erste Mal ständen sich die Kontaktvorrichtungen gegenüber, wenn gerade die Stromwelle durch null hindurchgeht. Nunmehr wird die eine Schneide während der weiteren Drehung mehr und mehr zurückbleiben. Nach sechs Sekunden werden sich dann die Schneiden wieder gegenüberstehen, aber in einer Lage, die um $\frac{1}{10}$ einer Umdrehung gegen die vorige zurück ist. Wir erhalten also jetzt die Spannung bei einer Lage des Ankers, die um 36° gegen die vorige verschieden ist. Nach abermals derselben Zeit erhalten wir die Spannung für eine um abermals $\frac{1}{10}$ Umdrehung verschobene Stellung des Ankers u. s. f.

Es leuchtet ein, daß, wenn man nur den Tourenunterschied der beiden Wellen, die beide Teile der Kontaktvorrichtung tragen, genügend klein macht, der Dauer der Periode für den Ausschlag des

Voltmeters eine beliebige Größe gegeben werden kann. Laufen beide Wellen synchron, so würde diese Periode unendlich groß werden. Man wählt die Periode so groß, daß einerseits die Schwingungsdauer des Voltmeters oder Galvanometers ohne Belang wird, und andererseits der Beobachter genügend Zeit hat, in beliebig vielen Punkten der Periode den Stand der Nadel sicher anzugeben.

Man verfährt zur praktischen Durchführung des Versuches folgendermaßen: Irgend eine drehbare Scheibe (z. B. die Riemenscheibe einer leer gehenden Dynamomaschine), die an einer Stelle ihres Umfanges mit einer Schleifbürste Kontakt macht, wird mittels Riemen direkt von der Riemenscheibe des Wechselstromerzeugers oder eines Synchronmotors derart angetrieben, daß ihre Umlaufszahl sich zu derjenigen des Stromerzeugers sehr nahe verhält wie die Polzahl des Stromerzeugers oder Motors zu einer geraden Zahl. Der Unterschied zwischen der Umlaufzahl der Scheibe und der des mit der Periodenzahl des Wechselstromes rotierenden Motors darf aber nur sehr gering sein. Diesen geringen Geschwindigkeitsunterschied erreicht man leicht dadurch, daß man die treibende und angetriebene Riemenscheibe möglichst gleich groß wählt und kleine Unterschiede des Durchmessers durch Aufkleben von Papierstreifen herstellt. Auf die angetriebene Riemenscheibe wird eine hölzerne Scheibe mit einer Kontaktstelle befestigt und auf dem Rand dieser Scheibe gleitet eine Kontaktfeder. Zwischen diese Feder und einen der beiden Punkte, deren Spannungsdifferenz gemessen werden soll, wird das zur Messung dienende Galvanometer oder Voltmeter geschaltet.¹⁾ Der rotierende Scheibenkontakt wird etwa durch einen Schleifring mit Feder mit dem anderen der beiden Punkte verbunden, deren Spannungsunterschied bestimmt werden soll.

Bei einer Anlage mit 50 Perioden wurden z. B. zwei Riemenscheiben von 120 *mm* Durchmesser verwendet und das Schlüpfungsverhältnis $\frac{\omega' - \omega''}{\omega''}$ derselben durch Aufkleben von Papierstreifen auf 0,00016 gebracht. Dadurch wurde die Periode des Galvanometerausschlages auf zwei Minuten gebracht. Dies ist Zeit genug, um 40 Beobachtungspunkte während einer solchen Periode von zwei Minuten aufzunehmen. Der Voltmeterausschlag verläuft sehr ruhig und sehr nahe proportional den Momentanwerten der Spannung. Dieses Verfahren kann selbstverständlich auch leicht zu einem registrierenden umgewandelt werden.

¹⁾ Bei einer Anlage mit 100 Volt Spannung z. B. ein Westonsches Millivoltmeter mit 500 Ohm induktionsfreiem Vorschaltwiderstand. Parallel zum Galvanometer mit Vorschaltwiderstand schaltet man einen Kondensator für 0,1 bis 0,5 Mikrofarad.

Drexler¹⁾ z. B. ließ von dem beweglichen Zeiger des Galvanometers die Induktionsfunken eines Ruhmkorffschen Induktionsapparates mit sehr hoher Unterbrecherzahl auf ein photographisches Papier überspringen, das senkrecht zur Bewegungsrichtung des Zeigers von einem Uhrwerk gleichförmig verschoben wurde.

Er verwendete einen von dem zu messenden Generator gespeisten, asynchronen Wechselstrommotor, dessen Tourenzahl sich, weil der Motor unbelastet war, dem Synchronismus außerordentlich näherte. Die Kontaktfeder kann dann ebenfalls feststehen, und es fällt in jede volle Periode ein Kontakt, und zwar ist der zeitliche Abstand zweier Kontaktgebungen stets etwas kleiner als eine Periode.

Diese Stromschlüsse benutzte er direkt zur Speisung eines eisenfreien Spulengalvanometers. Fig. 418 zeigt die Anordnung des Drexlerschen Apparates. A und B sind die beiden Punkte, zwischen denen die Spannungskurve gemessen werden soll, C ist die Achse des Motors mit der Kontaktvorrichtung, G das Galvanometer, dessen Feld durch zwei von Gleichstrom durchflossene Spulen gebildet wird. Z ist der am beweglichen Rahmen des Galvanometers befestigte Zeiger, S die Unterlage für das lichtempfindliche Papier, J der Induktionsapparat, der die von Z nach S überspringenden Induktionsfunken liefert.

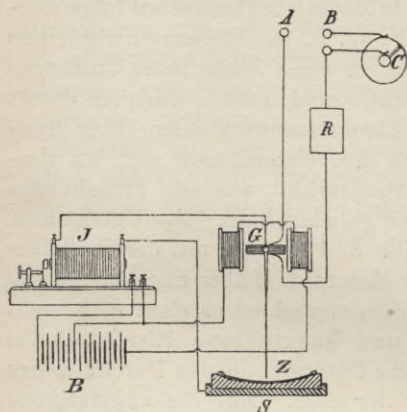


Fig. 418. Drexlers Apparat zur Aufzeichnung der Stromkurven.

Drexlerschen Apparates. A und B sind die beiden Punkte, zwischen denen die Spannungskurve gemessen werden soll, C ist die Achse des Motors mit der Kontaktvorrichtung, G das Galvanometer,

dessen Feld durch zwei von Gleichstrom durchflossene Spulen gebildet wird. Z ist der am beweglichen Rahmen des Galvanometers befestigte Zeiger, S die Unterlage für das lichtempfindliche Papier, J der Induktionsapparat, der die von Z nach S überspringenden Induktionsfunken liefert.

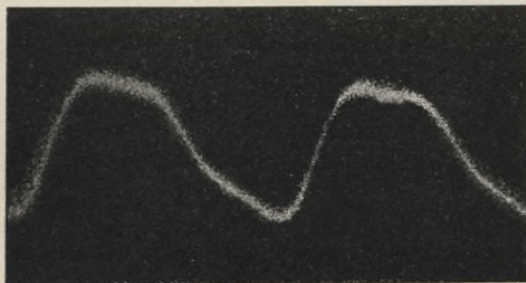


Fig. 419. Wechselstromkurve, aufgenommen mit dem Apparate von Drexler.

den Induktionsfunken liefert.

Die Batterie B speist mit ihrem linken Teile die Primärspule des Induktionsapparates; mit ihrem rechten Teile liefert sie den Strom

¹⁾ Man vergl. die Beschreibung des Drexlerschen Apparates. ETZ 1896, S. 378.

für die das Magnetfeld des Galvanometers erzeugenden Spulen. R ist ein induktionsfreier Vorschaltwiderstand.

Fig. 419 zeigt eine der mit Drexlers Apparat aufgenommenen Wechselstromkurven.

6. Frankes Kurvenindikator.

In etwas anderer Weise hat R. Franke den Joubertschen Gedanken zur Konstruktion eines zweckmäßigen Kurvenindicators benutzt.

Fig. 420 zeigt den Kontaktgeber. Zwei Bürsten B_1 und B_2 sind auf einer Hartgummischeibe befestigt und berühren nahe am Ende das Metallstück A_1 , das mit der Wechselstrommaschine verbunden ist. Die Bürste B_2 kann durch die Schraube C seitlich verschoben werden. Die übrigen Lamellen A_2 des Kollektors sind untereinander und von der Wechselstrommaschine isoliert.

Nur während der kurzen Zeit, in der beide Bürsten B_1 und B_2 gleichzeitig das Stück A_1 berühren, gelangt der Strom zum messenden Galvanometer. Die Kontaktbürsten B_1 und B_2 stehen mit zwei Schleifringen D in Verbindung, an welche mit Hilfe von Schleiffedern durch die nach unten führenden Leitungen der Stromkreis angeschlossen wird. Das Handrädchen H_1 (Fig. 421) dient dazu, vermöge der Schnecke F

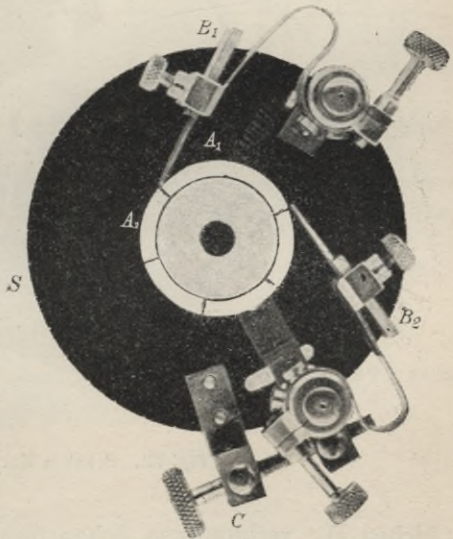


Fig. 420. Frankes Kurvenindikator.

und des Schneckenrades G die Bürsten B_1 und B_2 zu verdrehen; an einem Index I läßt sich die augenblickliche Stellung derselben ablesen.

Mit dem Galvanometer ist ein Spiegel verbunden. Auf den Spiegel sendet man einen Lichtstrahl, der für gewöhnlich gerade auf die Mitte einer Schreibtrommel T (Fig. 422) fällt, deren Achse parallel zur Bewegung des Lichtstrahles angeordnet und durch eine Schnur S zwangsläufig mit der Bewegung der Kontaktbürste verbunden ist. Diese Trommelbewegung entspricht der Abszissenbewegung der betreffenden Kurve.

Im Innern der Trommel T befindet sich eine Spiralfeder, durch welche die Trommel stets nach einer Seite herangezogen wird, wobei

sich an der rechten Seite die mit der Bürstenbewegung verbundene Schnur aufwickelt. Vor der Trommel ist zwischen zwei Schienen ein kleiner Wagen geführt, welcher einen Bleistift trägt und über diesem eine Marke zur Einstellung auf den Lichtfleck. Durch das an der rechten Seite angebrachte Handrädchen H_2 , kann der Bleistift in bequemer Weise hin- und herbewegt und dadurch die Bewegungen des Lichtstrahles verfolgt werden. Die Bewegung des Bleistiftes geschieht durch eine Schnur, welche sich auf einer mit dem Hand-

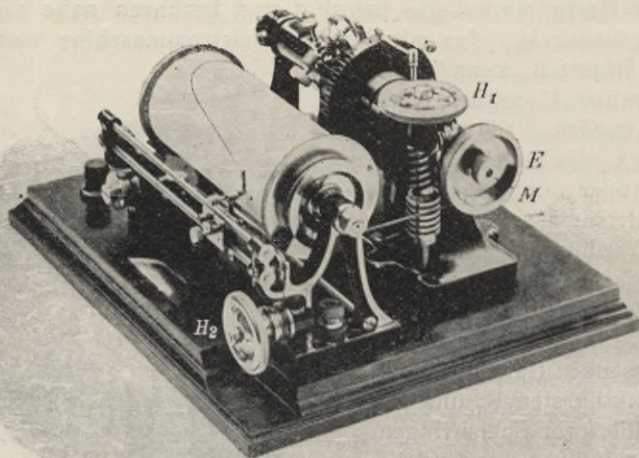


Fig. 421. Frankes Kurvenindikator.

rädchen H_2 verbundenen Schnurtrommel aufwindet, während sich von einer Trommel die gleiche Schnurlänge abwindet und im Innern dieser Trommel eine Feder gespannt wird. Diese Feder bewirkt den Rücklauf des Bleistiftträgers, wenn gleichzeitig das Handrädchen rückwärts gedreht wird, im anderen Falle dient eine an der Vorderseite des Handrädchens sichtbare, durch Schraube regulierbare Glockenfeder dazu, ein Zurückschnellen des Bleistiftträgers zu vermeiden. Auf der Trommel wird ein Papierblatt mit Hilfe zweier Befestigungsschienen festgehalten; dasselbe ist durch seitliche Verschiebung der Schienen nach rechts leicht lösbar. Der Trommelumfang ist so bemessen, daß nach Abzug der Breite der Befestigungsschienen eine Papierlänge von 180 mm bleibt, sodaß 1 mm Papierlänge 2^0 Bürstenverdrehung bedeuten. Die Papierbreite ist 150 mm.

Den Zusammenbau der Trommel mit den übrigen Teilen des Apparates zeigt Fig. 422.

Der Frankesche Apparat hat sich in der Praxis sehr gut eingeführt.¹⁾

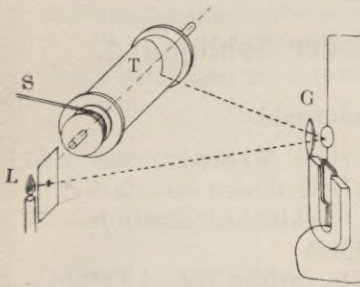


Fig. 422. Anordnung von Frankes Kurvenindikator.

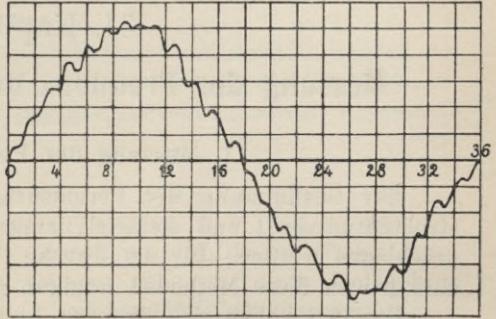


Fig. 423. Spannungskurve eines rotierenden Umwandlers.

Fig. 423 gibt beispielsweise die Darstellung der mit Frankes Apparat aufgenommenen Spannungskurve eines rotierenden Umformers. Der Kurzschluß der Spulen durch die Bürsten auf dem Gleichstromkommutator prägt sich in 24 kleinen Wellen von ganz charakteristischem Aussehen aus.

¹⁾ Über weitere Einzelheiten vergl. man die Originalarbeit: ETZ 1899 Heft 46.

31. Kapitel.

Messung der Frequenz und der Schlüpfung.

1. Messung der Periodenzahl.

Zur Bestimmung der Periodenzahl eines Wechselstromes sind stroboskopische¹⁾ und elektrodynamische²⁾ Methoden mehrfach vorgeschlagen worden; für die Zwecke der praktischen Elektrotechnik sind jedoch diese Methoden weniger geeignet.

Bewährt haben sich dagegen Apparate, welche darauf beruhen, daß Stimmgabeln oder Eisenzungen dadurch zum Schwingen gebracht werden, daß ihnen ein Elektromagnet genähert wird, dessen Windungen von dem Wechselstrom, für welchen man die Periodenzahl ermitteln will, durchflossen wird.

Stöckhardt³⁾ bringt zwischen die Zinken einer Stimmgabel einen Wechselstrommagneten und verändert durch Verschieben von Gewichten auf den Zinken der Stimmgabel deren Schwingungszahl so lange, bis sie von dem Elektromagneten, durch dessen Windungen der zu untersuchende Wechselstrom gesendet wird, zu kräftigem Tönen gebracht wird.

Die Gabel schwingt nur dann laut tönend kräftig, wenn ihre Schwingungszahl mit der Polwechselzahl des Wechselstromes genau übereinstimmt oder ein ganzes Vielfaches derselben ist.

Aus der Stellung der Gewichte kann man an einer empirisch festgestellten Skala die Frequenz ablesen. Selbstverständlich ist es, um sich in der Nummer des Vielfachen nicht zu irren, nötig, daß man die Frequenz bereits angenähert kennt.

Einen wirklich in der Praxis verwendbaren Frequenzmesser hat neuerdings Hartmann-Kempf⁴⁾ geschaffen.

In diesen von Hartmann & Braun (Frankfurt a. M.) hergestellten Instrumenten werden Stahlzungen, die auf bestimmte Schwingungszahlen genau abgestimmt sind, durch einen Elektro-

¹⁾ Benischke, ETZ 1899, S. 142 und Wachsmuth, Annalen d. Phys. 1901, S. 323.

²⁾ Davenport Mershon, D. R.-P. 114 308.

³⁾ Stöckhardt, ETZ 1899, S. 873.

⁴⁾ Hartmann-Kempf, Elektro-akustische Untersuchungen. Frankfurt a. M. 1903, ETZ 1901, S. 3.

magneten zum Tönen gebracht. Wenn die Wechselzahl des Wechselstromes mit der Schwingungszahl der Stahlzunge genau übereinstimmt, wird der Ausschlag der Zunge so groß, daß man ihre Schwingungen nicht nur hört, sondern auch deutlich sehen kann.

Fig. 424 gibt ein schematisches Bild des Wechselstrommagneten m und der davor befindlichen Zunge Z. Die Spule S wird von dem Wechselstrome durchflossen, dessen Periodenzahl ermittelt werden soll.

In untenstehender Fig. 425 ist die Amplitude der schwingenden Zunge (Ordinate) als Funktion der Wechselzahl (Abszisse) dargestellt.

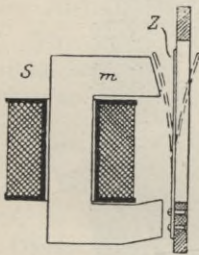


Fig. 424. Wechselstrommagnet mit Zunge.

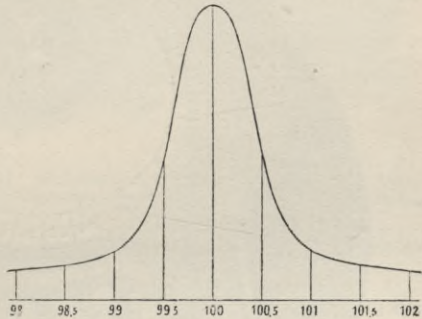


Fig. 425. Abhängigkeit der Schwingungsamplitude einer Stahlzunge von der Wechselzahl.

Man erkennt aus dieser Abbildung das jähe Ansteigen der Schwingungsamplitude, wenn der Eigenton der Zunge mit der Periodenzahl übereinstimmt. Die Form der Wechselstromkurve und die Spannung haben auf das Auftreten der elektro-akustischen Resonanzerscheinung keinen Einfluß; der Apparat ist daher auch für intermittierenden Gleichstrom brauchbar. Der zur Betätigung des Elektromagneten erforderliche Strom beträgt etwa 0,2 Ampère.

Die äußere Ausführung (vergl. Fig. 426) entspricht der der Schalttafelapparate. Das Instrument ist in jeder Lage zu gebrauchen. Die verschiedenen, genau abgestimmten Stahlzungen sind kreisförmig angeordnet und mittels eines Knopfes drehbar vor den Polen eines lammellierten Magnetaares. Letzteres kann zusammen- oder auseinander geschoben werden, sodaß beide Elektromagnete auf dieselbe Zunge wirken, oder so, daß 3 oder 5 Zungen eingegrenzt sind, wobei die mittlere, der normalen Frequenz entsprechende Zunge stille steht; das Ansprechen der benachbarten Zungen hingegen deutet auf eine eingetretene Schwankung der Frequenz.

Ein im Instrument befindlicher regulierbarer Vorschaltwiderstand gestattet, den Apparat für 80 bis 130 Volt zu benutzen. Für höhere Spannungen wird ein weiterer, besonderer Widerstand vorgeschaltet.

Die Serie von 32 Zungen kann beliebig zusammengestellt werden; z. B. von 65 bis 96 oder von 79 bis 110 Polwechsel in Abstufungen von je 1 Polwechsel.

Zeiger, die mit den Elektromagneten verbunden sind, geben auf einer Skala die Schwingungszahl der einzelnen Federn an (vergl. Fig. 426).

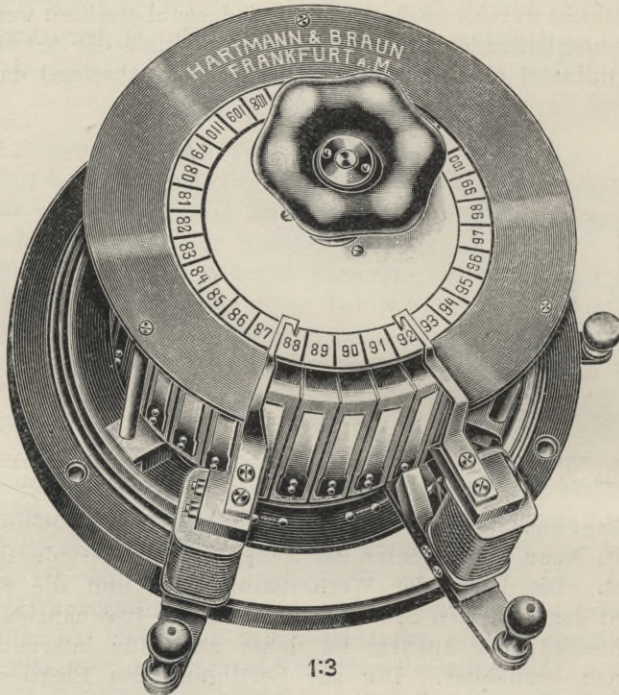


Fig. 426. Frequenzmesser in Dosenform mit 32 Zungen.

Durch Schätzung der Größe der Amplituden zweier benachbarten, schwingenden Federn können noch etwa zwei Zehntel der Polwechselzahl, die der doppelten Frequenz entspricht, sicher ermittelt werden.

2. Messung der Schlüpfung.

Soll die Schlüpfung des Ankers eines Asynchronmotors ermittelt werden, so bestimmt man mit dem einen Elektromagneten des Paares die Frequenz des Wechselstromes, der das Drehfeld erzeugt. Ist diese \sim_1 , so ist die Umlaufzahl u_1 des Drehfeldes in der Minute

$$u_1 = \frac{\sim_1 \cdot 60}{2 p_1} \dots \dots \dots 1)$$

wenn $2 p_1$ die Polzahl des Ständers ist.

Um die Umdrehungszahl des Läufers zu ermitteln, hält man an die Welle desselben einen Stromunterbrecher, der wie ein Handtoureuzähler gebraucht wird. (Vergl. Fig. 427.) Dieser Stromunterbrecher trägt auf einer isolierten Trommel, die sich gleichzeitig mit der Läuferachse dreht, in gleichen Abständen Gruppen verschieden langer Kupferstreifen. Auf diesen Kupferstreifen schleifen zwei Bürsten (B_1 B_2 in Fig. 428), von welchen die eine B_2 verschiebbar ist. In Fig. 428 ist der Umfang dieser Trommel abgewickelt gezeichnet.

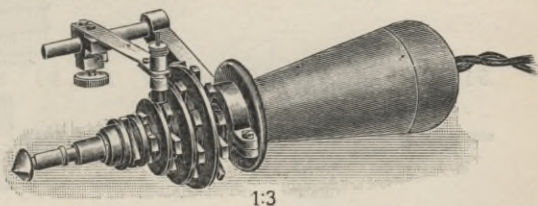


Fig. 427. Mehrfacher Stromunterbrecher zum Anlegen an Maschinenwellen für Schlüpfungsmessung.

Steht die Bürste B_2 in der Stellung a, so wird bei jeder Umdrehung der Achse ein durch eine Akkumulatorenbatterie E (von etwa 80 Zellen) gelieferter Gleichstrom z. B. 16 mal unterbrochen, in der Stellung b 8 mal, in der Stellung c 4 mal und in der Stellung d nur 2 mal.

Diesen unterbrochenen Gleichstrom führt man dem zweiten Elektromagneten zu, den man so lange längs der Zungen verschiebt, bis eine derselben gerade anspricht. (Vergl. Fig. 429.)

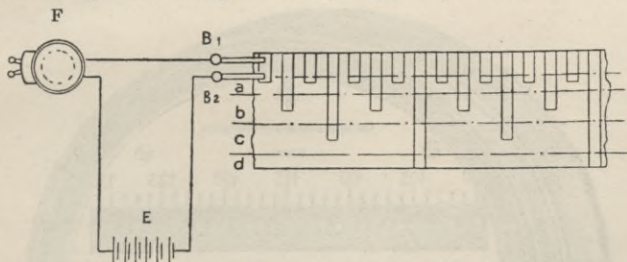


Fig. 428.

Gleichstromunterbrecher für einen Schlüpfungsmesser nach Hartmann-Kempf.

Steht z. B. die Bürste B_2 in der Stellung c und spricht die Zunge 83 an, so ist die Umlaufzahl u_2 des Läufers:

$$u_2 = \frac{83 \cdot 60}{4} = 1245.$$

Die Abbildung 429 erläutert schematisch die Anordnung bei einem Schlüpfungsmesser, dessen Zungen geradlinig nebeneinander angeordnet sind.

Man erkennt sofort, daß man einen Frequenzmesser in Verbindung mit einem derartigen Gleichstromunterbrecher auch als Tourenzähler für alle anderen Maschinen verwenden kann.

Bei Motoren, deren Läufer als Phasenanker gewickelt sind und Schleifringe zur Einschaltung von Widerständen beim Anlauf besitzen, kann man, um die Schlüpfung zu bestimmen, von zwei Schleifringen

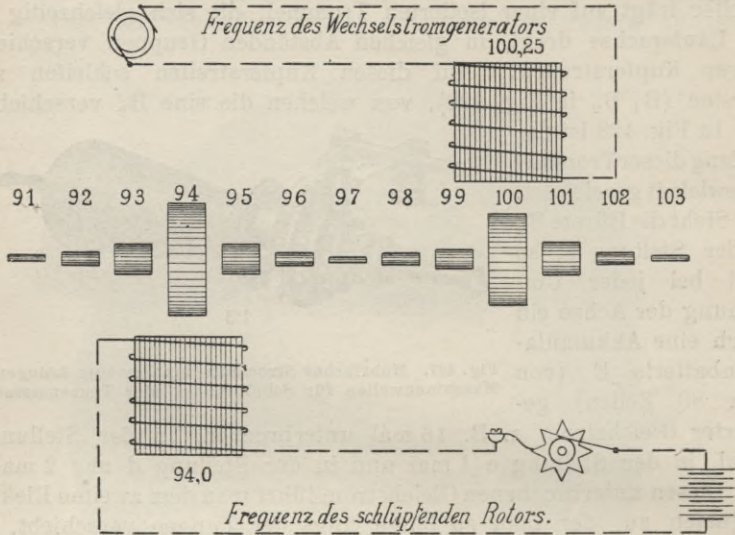
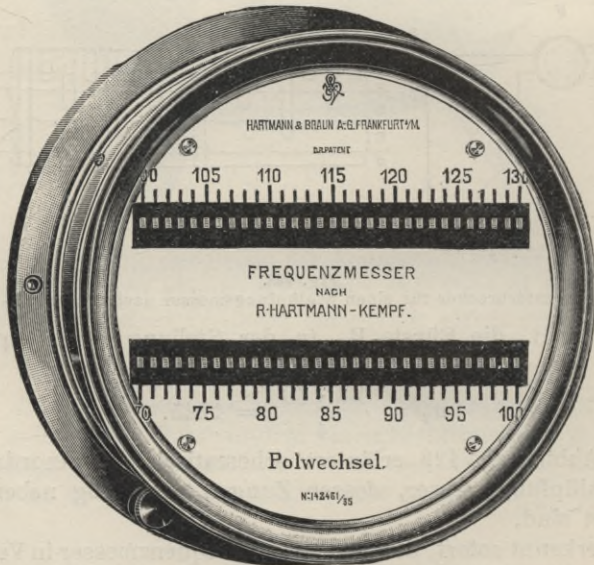


Fig. 429. Gebrauch des Schlüpfungsmessers.



1:3

Fig. 430. Frequenz und Schlüpfungsmesser in linearer Anordnung.

des Läufers aus Leitungen zu den Klemmen eines der beiden Elektromagneten des Frequenzmessers führen und mit diesem die Frequenz \sim_s des in den Läuferwindungen induzierten Wechselstromes bestimmen; mit dem anderen Elektromagneten ermittelt man gleichzeitig die Frequenz \sim_p des den Ständer durchfließenden primären Stromes;¹⁾ alsdann ist ohne weiteres das Schlüpfungsverhältnis σ

$$\sigma = \frac{\sim_p - \sim_s}{\sim_p} \dots \dots \dots 2)$$

¹⁾ Neuerdings hat Bianchi, ETZ 1903, S. 1046 noch einen Schlüpfungsmesser beschrieben.

32. Kapitel.

Messung von Selbstinduktionskoeffizienten.

1. Allgemeines.

In fast allen Formeln und Rechnungen kommen die Selbstinduktionskoeffizienten von Wechselstromapparaten vor, und zwar meist in der Form $2\pi \sim L$, wo \sim die Zahl der Perioden in 1 Sekunde und L den Selbstinduktionskoeffizienten bedeutet. Die Mitteilungen über Messungen an Wechselströmen würden daher unvollständig bleiben, wenn nicht der Weg zur Bestimmung dieser wichtigen Größen angegeben würde.

Die Bestimmung der Zahl der Perioden \sim bietet, wie wir im vorhergehenden Kapitel gesehen haben, keine Schwierigkeit dar. Versteht man unter U die Zahl der Umläufe des Stromerzeugers in 1 Minute und mit p die Anzahl der Polpaare der Feldmagneten, so ist:

$$\sim = \frac{U \cdot p}{60} \dots \dots \dots 1)$$

Größere Schwierigkeiten bietet die Ermittlung des Selbstinduktionskoeffizienten L , da der in Kap. 11, Abschn. 13., S. 161, angegebene Weg nicht immer benutzbar ist. Eine einfache und bequeme, besonders auch bei größeren Wechselstromapparaten leicht verwendbare Methode gibt es zur Zeit noch nicht.

Bei der Messung von Induktionskoeffizienten handelt es sich, da der Induktionskoeffizient im elektromagnetischen Maßsystem die Dimension einer Länge hat, entweder um Messung eines Widerstandes w und einer Zeit, oder eines Widerstandes und einer Kapazität C , oder einer Kapazität und einer Zeit. Ist der Widerstand in Ohm, die Kapazität in Farad und die Zeit in Sekunden gegeben, so erhält man den Selbstinduktionskoeffizienten in Henry.

Indem wir im übrigen auf das in »Grundzüge der Gleichstromtechnik«¹⁾ über diese Art von Messungen Mitgeteilte verweisen, wollen wir hier nun eine Methode kurz beschreiben, nach der recht befriedigende Resultate in verhältnismäßig kurzer Zeit erlangt werden können.

¹⁾ Vergl. Grundzüge der Gleichstromtechnik, Kap. XVI, Die Messung der Induktionskoeffizienten, S. 326.

2. Methode von Kempe.¹⁾

Die Vorrichtung S, deren Selbstinduktionskoeffizient L gefunden werden soll, wird gleichzeitig mit einem induktionsfreien Widerstand w_1 in die vierte Seite einer Wheatstoneschen Brücke eingeschaltet und in der Brücke Gleichgewicht hergestellt, sodaß die Nadel des Galvanometers G nicht ausschlägt (vergl. Fig. 431), wenn die Batterie dauernd eingeschaltet wird.

Man drückt den Schlüssel n des Galvanometers nieder, öffnet die Batterie und beobachtet den durch die Selbstinduktion der Spule S verursachten ersten Ausschlag des ballistischen Galvanometers G. Dieser Ausschlag sei δ_1 .

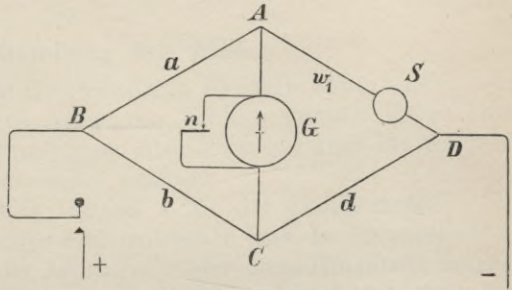


Fig. 431. Messung des Koeffizienten der Selbstinduktion nach Kempe.

Dann ersetzt man die Spule S durch einen Kondensator von bekannter Kapazität C, wie solche von allen zuverlässigen Verfertigern elektrotechnischer Meßapparate zu beziehen sind. Die Klemmen des Kondensators sind durch einen bekannten induktionsfreien Widerstand W geschlossen; außerdem schaltet man dem Kondensator noch einen induktionsfreien Widerstand w_2 vor. (Vergl. Fig. 432.)

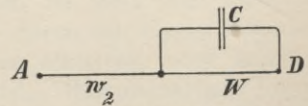


Fig. 432.

Nummehr wiederholt man den Versuch und beobachtet die Ablenkung δ_2 .

Erfüllen die abgleichbaren Widerstände w_1 , w_2 und W und der Ohmsche Widerstand w des zu messenden Apparates S die Bedingung:

$$w_1 + w = W + w_2,$$

so ist der gesuchte Selbstinduktionskoeffizient L

$$L = C \cdot W^2 \cdot \frac{\delta_1}{\delta_2} \dots \dots \dots 2)$$

Man wählt die Widerstände w_1 , w_2 , W so, daß δ_2 möglichst gleich δ_1 wird.

Ist C in Mikrofarad und W in Ohm gegeben, so hat man das Resultat der nach Formel 2) geführten Rechnung mit 10^{-6} zu multiplizieren, um L in Henry zu erhalten.

¹⁾ Mit Verbesserungen von Tobler. Vergl. ETZ Bd. XV, 1894, S. 584.

Das Galvanometer G muß starke Dämpfung haben, und sein bewegliches System muß sich so langsam bewegen, daß man bei den ballistischen Ausschlägen noch Zehntel eines Skalenteils bequem ablesen kann.

Tobler empfiehlt den Gebrauch eines astatischen Galvanometers von Siemens & Halske und eines Doppelschlüssels von Hartmann & Braun mit zwei Quecksilberkontakten.



Das Galvanometer G muß starke Dämpfung haben, und sein bewegliches System muß sich so langsam bewegen, daß man bei den ballistischen Ausschlägen noch Zehntel eines Skalenteils bequem ablesen kann.

Tobler empfiehlt den Gebrauch eines astatischen Galvanometers von Siemens & Halske und eines Doppelschlüssels von Hartmann & Braun mit zwei Quecksilberkontakten.

33. Kapitel.

Wechsel- und Drehstromzähler.

1. Einteilung der Zähler.

Von den bereits in den Grundzügen der Gleichstromtechnik besprochenen verschiedenen Arten von Zählern können einige ohne weiteres, andere nach geringfügigen Abänderungen auch für Wechselströme und Drehstrom verwendet werden.

Unter den Motorzählern können z. B. der Thomsonzähler, die diesem prinzipiell verwandten Konstruktionen und der Ferrantzähler, unter den Uhrenzählern der Aronsche Zähler ohne Hinzutritt wesentlicher Teile auch für die Messung periodisch veränderlicher Ströme benutzt werden. Auch die absatzweise registrierenden Zähler, von denen wir a. a. O. als Beispiel den Siemenszähler beschrieben haben, können leicht so abgeändert werden, daß sie für Wechselströme brauchbar werden.

Bei den Motorzählern für Gleichstrom ist stets eine Stromzuführung zu dem rotierenden Teile nötig; durch die hierzu erforderlichen Bürsten, die auf kleinen Kollektoren schleifen, oder sonstige Einrichtungen kommt stets eine erhebliche Reibungsarbeit hinzu, deren Veränderlichkeit und Größe eine wesentliche Fehlerquelle bilden.

Bei Wechselstromzählern geben die Induktionserscheinungen ein neues und eigentümliches Hilfsmittel die rotierenden Anker auch ohne Stromzuführung in Bewegung zu setzen, indem man diese Anker als Kurzschlußanker ausbildet und sie der Wirkung eines Drehfeldes aussetzt.

Die erste Anregung zur Herstellung derartiger Induktionszähler rührt von Ferraris her. Bei Erfindung des magnetischen Drehfeldes erkannte er die Bedeutung desselben für die Herstellung leistungsfähiger Wechselstrommotoren nicht; er spricht sich aber mit voller Deutlichkeit¹⁾ dahin aus, daß das neue Prinzip eine geeignete Grundlage für die Herstellung von Zählern für Wechselstromanlagen abgeben werde. Ferraris schlug vor zwei um 90° versetzte Wechselfelder zu verwenden, die durch zwei um eine Viertelperiode in der

¹⁾ Atti della R. Accademia delle scienze di Torino, Vol. XXIII, Disp. 9 a. 1887 bis 1888.

Die Konstante k enthält neben der Intensität der Bremsmagnete auch die Periodenzahl und das Verhältnis des Trommelwiderstandes zu dem der Bremsscheibe.

Die Erfahrung hat aber gezeigt, daß die Abhängigkeit von der Periodenzahl bei richtiger Bemessung der einzelnen Größen nur sehr gering ist.

Die oben eingeführte Bedingung, $\psi = 90^\circ$ zu machen, ergibt die Notwendigkeit das der Spannung E proportionale Nebenschlußfeld so zu justieren, daß es zeitlich genau um 90° gegen das der Stromstärke J proportionale zurückbleibt.

3. Die Mittel, um eine Phasenverschiebung um 90° zu erzielen.

Der praktisch wichtigste Weg um Ströme beziehentlich auch Spannungen gegen die Grundspannung um 90° in der Phase zu verschieben, ist der von Görges angegebene, der auf den Gebrauch der

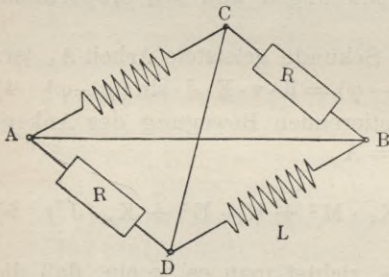


Fig. 433.

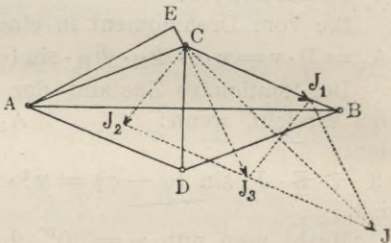


Fig. 434.

Schaltung und Diagramm der Görges'schen Brücke.

bekanntem Schaltung hinauskommt, die der Wheatstoneschen Brücke zugrunde liegt (vergl. Gleichstromtechnik, Kap. I, 22, S. 23). Der untere und obere Teil dieser Brücke ist völlig symmetrisch. Die beiden unteren Seiten mögen mit 1 und 2, die oberen mit 3 und 4 bezeichnet sein; die zugehörigen Größen sollen dieselben Zahlen als Indices führen.

Es stellt Fig. 433 die Schaltung und Fig. 434 das Diagramm der Görgesschen Brücke dar.

AB in Fig. 434 ist die Grundspannung, CD die Diagonalspannung der Brücke. Der Strom in der oberen Drosselspule L sei J_3 , die Klemmenspannung sei gleich AC, dann ist die EMK gleich AE und der Ohmsche Spannungsverlust gleich CE.

Der Strom in dem induktionsfreien Widerstand R sei J_1 , die Klemmenspannung sei gleich CB, so ergibt sich der Diagonalstrom aus der Beziehung

$$J_2 = J_3 - J_1 \dots \dots \dots 8)$$

Wegen der vorausgesetzten Symmetrie der Brücke hat der Strom in der Widerstandsseite AD gleiche Richtung und Größe mit J_1 . Es ergibt sich dann der Gesamtstrom J der Brücke aus der Beziehung

$$J = J_1 + J_3 \dots \dots \dots 9)$$

Man erkennt aus dem Diagramm sofort, daß es bei passender Wahl der Verhältnisse von R und L möglich ist, daß sowohl die Diagonalspannung CD auf der Hauptspannung AB , als auch der Diagonalstrom J_2 auf dem Gesamtstrom J senkrecht steht.

Will man diese Schaltung zum Betriebe eines Wechselstrommotors anwenden, so legt man die Arbeitsphase an die Hauptspannung AB und die Kunstphase an die Diagonalspannung CD .

Bei passender Wahl der Verhältnisse kann man es wieder erreichen, daß sowohl die beiden Spannungen AB und CD , sowie die Ströme der Arbeits- und der Kunstphase aufeinander senkrecht stehen.

Theoretisch kann man mit dieser Brückenordnung zwischen zwei Spannungen sowohl wie zwischen zwei Strömen beliebige Phasenverschiebungen zwischen 0 und 180° direkt hervorbringen.

In der Praxis stellen sich die Grenzen auf etwa 0 und 150° .

Diese Brückenschaltung ist auch sehr gut für den Betrieb von Wechselstrommotoren anwendbar. Bei Meßgeräten für hohe Spannungen ist der Umstand hinderlich, daß die induktionsfreien Widerstände sehr groß ausfallen. Deshalb verwenden Siemens & Halske bei ihren Meßapparaten nach Ferrarisschem Prinzip eine kleine Abänderung.

Die beiden Spannungsspulen SS des Apparates werden mit zwei induktionsfreien Widerständen RR zu einer Wheatstoneschen Brücke vereinigt; in den Diagonalzweig legt man einen induktionsfreien Widerstand D und schaltet vor die so gebildete Brücke eine Drosselspule, die den weitaus größten Teil der Hochspannung aufnimmt. (Vergl. Fig. 435.)

Bezeichnet man die Stromstärken in den gleichen Spannungsspulen SS mit i_s , und die in den gleichen induktionsfreien Widerständen RR mit i_R und endlich die Stromstärke im Diagonalzweig mit i_d , so ist nach dem Kirchhoffschen Gesetze

$$i_s = i_R + i_d \dots \dots \dots 10)$$

Der Strom i in der Drosselspule

$$i = i_s + i_R = 2 i_R + i_d \dots \dots \dots 11)$$

In dem in Fig. 436 gezeichneten Vektordiagramm ist:

$ce = fd = E_s$ die Spannungsdifferenz an den Enden einer der Spulen SS , $cd = cf = E_R$ die Spannung an einem der Widerstände RR und endlich $ef = E_D$ die Spannung an den Enden des Diagonalwiderstandes D . Ferner ist db die Spannung der Drosselspule und cb die Klemmenspannung E .

Einen anderen Weg hat die Union Elektrizitätsgesellschaft in Berlin bei ihren Zählern eingeschlagen, um das Nebenschlußfeld so einzurichten, daß es zeitlich um eine Viertelperiode gegen das Hauptfeld zurückbleibt.¹⁾ Es werden durch verschiedene Wicklungen zwei Felder im Nebenschlußisen erzeugt, die sich so zusammen setzen, daß das resultierende Feld senkrecht auf dem Hauptfelde steht (Schaltungen von Raab, Shallenberger, Catenhusen).

Da im metallischen Anker, der von den Kraftlinien des Nebenschlusses geschnitten wird, Wechselströme entstehen, so setzt sich deren Feld mit dem von der Nebenschlußspule erzeugten zu einem resultierenden Felde zusammen. Dieses resultierende Feld muß so geregelt werden, daß es um 90° gegen das Hauptfeld zurückbleibt. Auch das Hauptstromkraftlinienfeld muß mit dem Felde der von ihm im Anker erzeugten Wirbelströme zusammengesetzt werden.

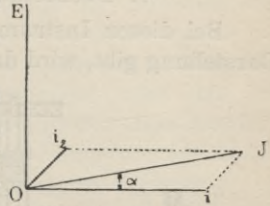


Fig. 437. Diagramm der Hummelschen Methode der Phasenverschiebung.

Bei den Induktionszählern der Union E.-G. ist der Nebenschlußstromkreis unverzweigt und die motorische Spule, die in Hintereinanderschaltung zur Drosselspule liegt, trägt nur eine Wicklung.

Im Diagramm (Fig. 438) ist OA die EMK der Drosselspule, auf der der Nebenschlußstrom des Zählers i_s senkrecht steht. In Richtung dieses Stromes verläuft der Ohmsche Spannungsabfall AB der Drosselspulen; die Resultierende OB ist dann die Klemmenspannung der Drosselspule. Die EMK der motorischen Spule ist OC; ihr Spannungsabfall CD liegt wiederum in der Richtung von i_s . Die Resultante OD ist die Klemmenspannung der motorischen Spule. OB und OD setzen sich zur Netzspannung OE zusammen. Die Linie OF gibt dann die Richtung des Nebenschlußfeldes, das beim richtig eingestellten Zähler auf der Klemmenspannung senkrecht stehen muß. Dieses

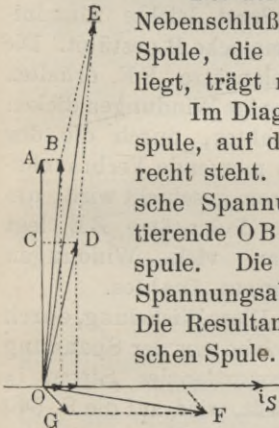


Fig. 438. Felderdiagramm beim Unionzähler.

Feld entsteht durch Zusammensetzung des in gleicher Richtung wie i_s liegenden Feldes und eines Vektors OG, der das von den Wirbelströmen der Scheibe hervorgerufene Feld repräsentiert. Dieser Vektor ist nicht bestimmbar; er ist von der Frequenz abhängig und zwar in dem Sinne, daß er bei höherer Frequenz einen größeren Winkel mit OE bildet. Tatsächlich kommt im Zähler zwischen Netz-

¹⁾ ETZ 1902, S. 775.

spannung und Nebenschlußstrom eine Phasenverschiebung von rund 69° zustande, während das magnetische Feld des Nebenschlusses um 90° gegen das des Hauptstromes bei induktionsloser Last verzögert ist. Die Einstellung muß daher empirisch erfolgen.

4. Drehfeldmeßgeräte von Siemens & Halske.

Bei diesen Instrumenten, von denen Fig. 439 eine schematische Darstellung gibt, wird das Drehfeld in einem ringförmigen, aus dünnem Eisenblech aufgebauten Körper A erzeugt, der vier radial nach innen gerichtete Polansätze EE und FF besitzt. Innerhalb dieses Ringes befindet sich in geringem Abstände ein ebenfalls aus geblättertem Eisen hergestellter Eisenkern C.

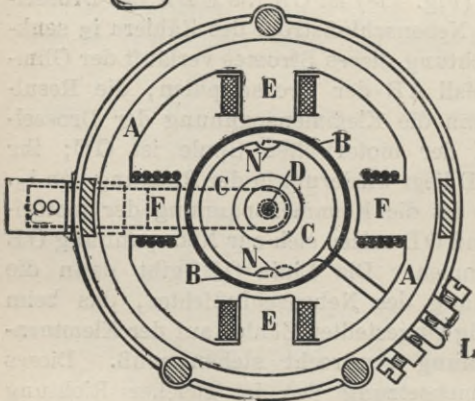
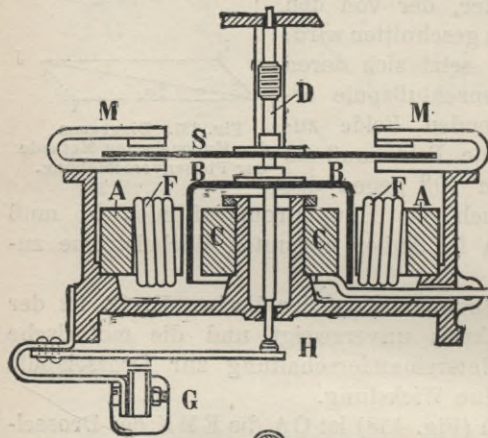


Fig. 439. Schematische Darstellung des Drehfeldzählers von Siemens & Halske.

Über diesen ist eine äußerst leichte Aluminiumglocke B gestülpt. Die Polansätze FF erhalten wenige Windungen dicken Drahtes, durch die der zu messende Verbrauchstrom geschickt wird; um die Polansätze EE legt man viele Windungen dünnen Drahtes.

Diese Wickelung, durch welche ein der Spannung proportionaler Strom i_s fließt, wird auf die S. 540 (Fig. 435) angegebene Weise an die Netzspannung angeschlossen und dem Strom i_m gegen die Klemmenspannung dadurch eine Phasenverschiebung von 90° erteilt.

Das Drehungsmoment, welches die Glocke erfährt, ist dann dem Produkte $E \cdot J \cdot \cos \varphi$ proportional.

Um den Einfluß der Zapfenreibung möglichst zu vermeiden, reduziert man die Umdrehungsgeschwindigkeit durch eine magnetische

Bremse.¹⁾ Eine mit der Glockenachse verbundene, gewellte Aluminiumscheibe S bewegt sich zwischen den Polen zweier schwachen Dauermagnete²⁾ MM.

Die Achse D ist mit einer Schnecke versehen, die in ein Zählwerk mit springenden Zahlen eingreift, sodaß man den Arbeitsverbrauch während einer bestimmten Zeit sofort aus der Differenz der Ablesungen am Ende und am Anfang dieser Zeit ablesen kann.

Um die Reibung möglichst zu mindern und zumal um die Reibung der Ruhe beim Angehen des Zählers zu überwinden, wird das bewegliche System des Zählers fortwährend erschüttert. Dies bewirkt der kleine Elektromagnet G, dessen beweglicher Anker die das Steinlager H tragende Feder F in kräftige Schwingungen versetzt.

Das ganze bewegliche System des Zählers wiegt nur 27 g.

Das Instrument verträgt erhebliche Überlastung und läuft bei $\frac{1}{2}$ % der höchsten Belastung zuverlässig an. Gegen Kurzschlüsse ist der Apparat in ungewöhnlich hohem Grade unempfindlich. Von der Periodenzahl und Kurvenform des Stromes sind die Angaben wenig abhängig.

Um den Einfluß der Zapfenreibung zu kompensieren, wird der verstellbare Eisenkern C (Fig. 439) an seiner den Spannungspolen EE gegenüberstehenden Zylinderfläche mit je einer kleinen Nute N versehen. Stehen diese Nuten symmetrisch zu den Spannungspolen, so wird ohne Verbrauchsstrom kein Drehungsmoment auf die Trommel ausgeübt. Verdreht man jedoch den Kern ein wenig, sodaß etwa die Nuten in die punktiert gezeichnete Stellung kommen, so tritt ein kleines Drehungsmoment auf, und zwar dreht sich die Trommel gerade der Richtung entgegengesetzt, nach der man vorher den Kern drehte.

Diese Einrichtung ist durch die Schraube L verstellbar.

Um den Leerlauf zu vermeiden, einen Fehler, den bei höheren Spannungen alle Zähler zeigen, die durch den Nebenschlußstrom ein schwaches Zusatzdrehmoment zur Überwindung der Reibung erhalten, wird der untere Rand der drehbaren Trommel B mit einer Anzahl, meist vier, ganz kleinen Einschnitten versehen. Man erreicht hierdurch, daß der Widerstand der Trommel nach einer bestimmten Achse ein kleinerer, nach einer anderen, darauf senkrechten Achse ein größerer wird.

Die Trommel stellt sich dann stets so vor die Spannungspole, daß der in ihr erzeugte Strom ein Minimum ist, sie ist dann nach

¹⁾ Die magnetische Bremsung wurde von Werner v. Siemens erfunden und zuerst bei einem von ihm konstruierten Zähler angewendet. D. R.-P. 40 632 vom Jahre 1886.

²⁾ Schwache Dauermagnete sind unveränderlicher als starke.

der einen oder der anderen Seite nur mit Aufwand einer bestimmten Kraft drehbar. Wir haben hier ein ähnliches Verhalten wie bei der Reibung, nur daß diese Reibung eine ideale ist, die sich niemals ändert, und die genau dem Quadrate der Spannung proportional bleibt. Ihre absolute Größe ist so gewählt, daß sie die eigentliche Zapfenreibung bedeutend überwiegt, sodaß deren Änderungen keinen Einfluß mehr besitzen.

Da nun andererseits das durch die vorher beschriebene Einrichtung hervorgebrachte Zusatzdrehmoment ebenfalls dem Quadrate der Spannung proportional ist, so muß der Zähler, wenn er für eine bestimmte Spannung justiert ist, auch bei jeder anderen Spannung kompensiert sein. Es ergab sich, daß solche Zähler tatsächlich bei um 50, ja um 100% erhöhter Spannung keinen Leerlauf besitzen.

In Fig. 440a ist die Einrichtung eines Ferrariszählers von Siemens & Halske abgebildet. Am unteren Ende ist die Vorrichtung eingebaut, die dazu dient dem Spannungsstrom die Phasenverschiebung von 90° zu erteilen. Fig. 440b

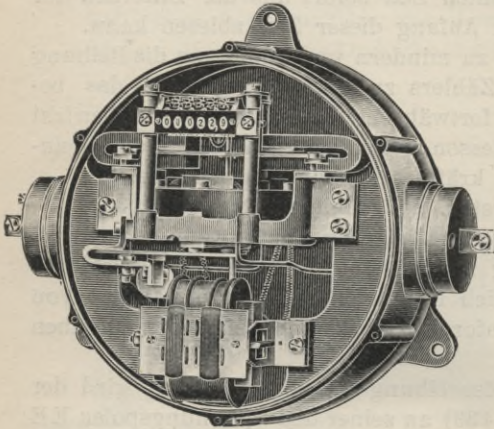


Fig. 440a.

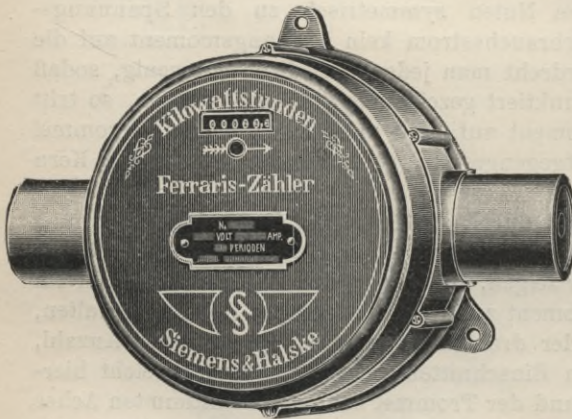


Fig. 440b.

Drehfeld-Wechselstromzähler von Siemens & Halske.

gibt die äußere Erscheinung des Zählers, aus der man erkennen kann, daß er gegen das Eindringen von Staub und Feuchtigkeit völlig geschützt ist.

Für Messung des Arbeitsverbrauches in Drehstromanlagen werden, wenn die einzelnen Phasen stets gleich belastet sind (z. B. bei Drehstrommotoren) einfache Wechselstromzähler verwendet. Die Strom-

spulen des Zählers werden in eine der Drehstromzuleitungen eingeschaltet. Die Spannungswickelung schließt man an diese Zuleitung und eine der beiden anderen an.

Für die Messung der Arbeit in Drehstromnetzen mit ungleich belasteten Phasen dienen Zähler mit zwei Systemen, deren umlaufende Teile miteinander starr verbunden sind (vergl. Fig. 441). Jedes von beiden Systemen wird von je zwei Strömen, aber nur von je einer Spannung beeinflusst.

Bezeichnet man die Momentanwerte der drei Ströme in den drei Phasen mit i_a, i_b, i_c und die gegenüberliegenden Spannungen mit e_a, e_b, e_c (vergl. Fig. 442), so ist die Drehstromleistung a in diesem Augenblicke (vergl. Kap. 28, 8, S. 497)

$$a = (i_a + i_c) e_a - (i_b + i_c) e_c 12)$$

Von den auf die obere Glocke wirkenden Spulen FF wird durch die eine der Strom i_a , durch die andere i_c gesendet, während die

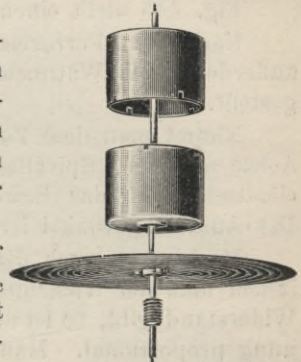


Fig. 441. Beweglicher Teil eines Drehstromzählers.

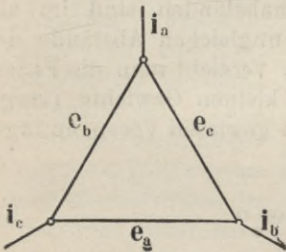


Fig. 442.

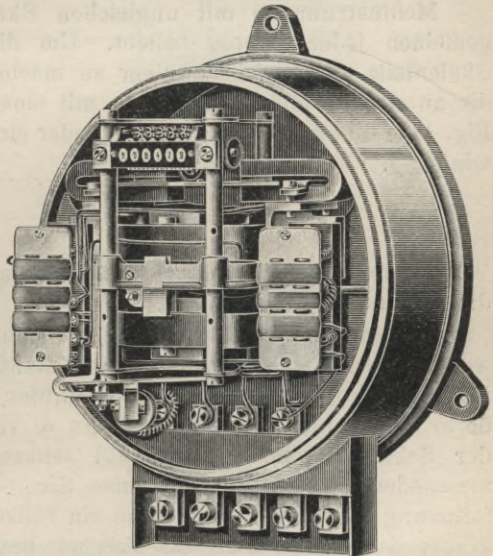


Fig. 443. Ferraris-Drehstromzähler von Siemens & Halske.

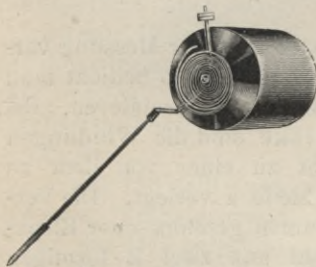


Fig. 444. Trommel eines Ferraristromzeigers.

beiden Spannungsspulen in der (S. 540) beschriebenen Brückenschaltung an die Spannung e_a angeschlossen werden. Von den Stromspulen, die auf die untere Glocke wirken, wird die eine von i_b ,

die andere von i_c durchflossen, während die Spannungsspulen an e_c angeschlossen werden.

Fig. 443 stellt einen solchen Drehstromzähler dar.

Nach dem Ferrarisschen Prinzipie haben Siemens & Halske außerdem auch Wattmeter, Spannungszeiger und Stromzeiger hergestellt.

Nimmt man dem Zähler das Zählwerk und versieht man seine Achse mit einer Spiralfeder, die dem Drehungsmoment durch ihre elastische Kraft das Gleichgewicht hält, so erhält man ein Wattmeter. Der Ausschlagswinkel ist dann der Leistung proportional.

Macht man auch die Stromspulen von der Spannung abhängig, indem man der Wickelung, die um FF liegt, einen genügend großen Widerstand gibt, so ist das Drehungsmoment dem Quadrate der Spannung proportional. Man erhält auf diese Weise einen Spannungszeiger mit einer nach Quadraten der zu messenden Größe fortschreitenden Skala.

Ersetzt man aber die Spannungswickelung durch wenige Windungen dicken Drahtes, so ergibt sich ein Strommesser mit quadratischer Skala.

Meßinstrumente mit ungleichen Skalenabständen sind im allgemeinen jedoch wenig beliebt. Um die ungleichen Abstände der Skalenteile etwas gleichmäßiger zu machen, versieht man die Feder, die an der Trommelachse sitzt, mit einem kleinen Gewichte (vergl. Fig. 444) und erteilt dadurch der Feder einen gewissen Vorspannungswinkel β . Es ist dann:

$$i = c \cdot \sqrt{1 + \frac{a}{\beta} - \cos \alpha} \dots \dots \dots 13)$$

Wegen weiterer Einzelheiten dieser Meßapparate verweisen wir auf die Originalabhandlung.¹⁾

Will man die starken Ströme, die gemessen oder zur Messung verwendet werden sollen, nicht an die Schalttafel führen, so bedient man sich der schon früher (S. 479) erwähnten Stromtransformatoren. Bei derartigen Apparaten von Siemens & Halske sind die Windungen der Sekundärspule b (Fig. 445) senkrecht zu einer von dem zu messenden Strome durchflossenen Stromschleife a verlegt. Die Vermittelung zwischen beiden bildet ein vollkommen geschlossener Eisenkörper dd ee. Dieser Eisenkörper besteht aus zwei E-förmigen Teilen c, deren mittlere Stege cc die Sekundärspule b tragen. Gleichzeitig gehen sie durch das Kupfer der primären Stromschleife parallel zu deren Windungsebene hindurch. Durch passende Einschnitte dd

¹⁾ Vergl. Schrottke, ETZ 1901, Heft 33.

wird der Strom von der einen Seite mehr nach der anderen gedrängt und eine Magnetisierung hervorgerufen, die der Differenz beider Stromteile proportional ist. Auf diese Weise ist der Bruchteil einer Windung wirksam gemacht.

Fig. 445 zeigt einen solchen Stromtransformator für 3000 Ampère.

Um nicht mit lebensgefährlichen Spannungen an das Schaltbrett heran gehen zu müssen, werden die Meßinstrumente an Spannungstransformatoren angeschlossen. Die Hochspannungswicklung wird in zwei ineinander passende Ringgefäße aus best isolierendem Porzellan eingeschlossen. Für ganz hohe Spannungen (über 5000 Volt) werden die Zwischenräume im

Vakuum außerdem noch mit Isoliermasse ausgefüllt. Auch sonst wird zur Isolation der hohen Spannungen führenden Leitungen durchaus Porzellan verwendet.

Fig. 446 stellt einen solchen Transformator dar, der dazu bestimmt ist die zu messende Spannung von 10000 Volt auf 120 Volt herabzusetzen. Die Fig. 447 gibt ein Bild von den angewendeten Porzellankapseln.

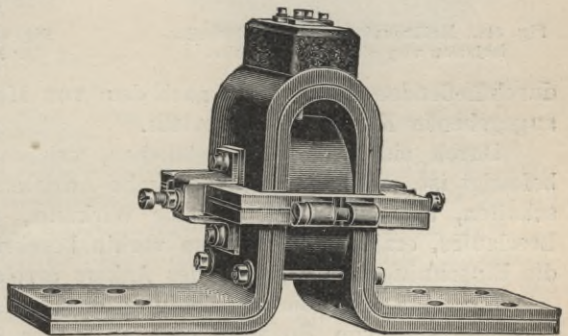
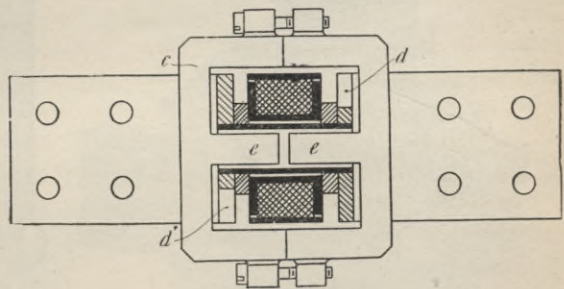
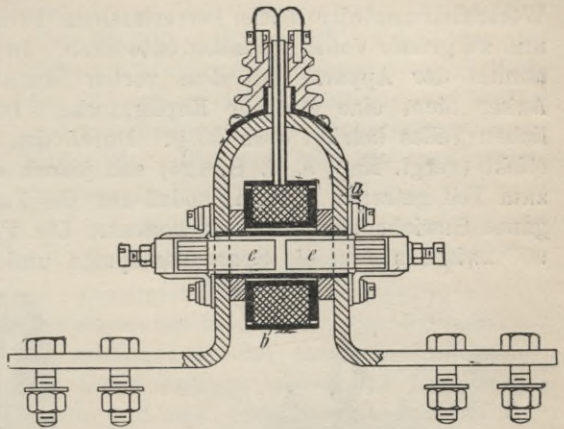


Fig. 445. Stromtransformator von Siemens & Halske.

Fig. 447 gibt ein Bild von den angewendeten Porzellankapseln.

5. Drehfeldzähler der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft.

Die A. E. - G. hat den seiner Zeit von Hummel erfundenen Wechselstromzähler nach Ferrarisschem Prinzip weiter ausgebildet und zu großer Vollkommenheit entwickelt. In den wesentlichen Teilen stimmt der Apparat mit dem vorher beschriebenen überein. Als Anker dient eine einfache Kupferglocke. Das Gewicht des beweglichen Teiles beträgt etwa 60 g. Durch den sogenannten Thomsoneffekt (vergl. Kap. 9, 4, S. 124) soll jedoch das Gewicht der Glocke zum Teil getragen werden, sodaß für die Zapfenreibung nicht das ganze Gewicht zur Wirkung kommt. Die Phasenverschiebung um 90° zwischen dem die Spannungsspulen und dem die Stromspulen

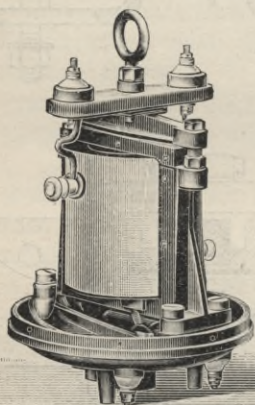


Fig. 446. Meßtransformator mit Porzellanisolation von Siemens & Halske.

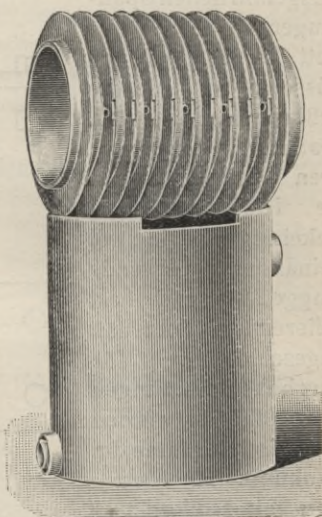


Fig. 447. Porzellanisolation für Meßtransformatoren.

durchfließenden Strome wird nach dem von Hummel (vergl. S. 540) angegebenen Kunstgriff hergestellt.

Durch ein kleines Eisenstäbchen, welches an der Bremscheibe befestigt ist, wird durch magnetische Anziehung eine Haltstelle geschaffen, also prinzipiell dieselbe Wirkung, die Verhinderung des Leerlaufes, erzielt, die bei dem vorhin beschriebenen Zähler durch die Einschnitte in den Rand des Ankers erreicht worden war.

Fig. 448 läßt die Einrichtung dieses Zählers erkennen. Die Apparate sind von Spannungsschwankungen innerhalb $\pm 20\%$ unabhängig, sie laufen bei 1% der Vollbelastung sicher an, sie vertragen erhebliche Überlastung und verbrauchen für je 100 Volt Betriebsspannung nur 1,5 Watt.

Unter erheblicher Vereinfachung in der Anwendung des Ferraris'schen Prinzipes ist der Drehstromzähler der A. E.-G. für ungleich belastete Phasen gebaut, den die Fig. 449 darstellt. Es ist der einfachste, kleinste und leichteste Apparat dieser Art. Zu seinem Betrieb sind nur zwei Ströme und eine Spannung des Drehstromnetzes erforderlich. Fig. 450 zeigt die angewendete Schaltung.

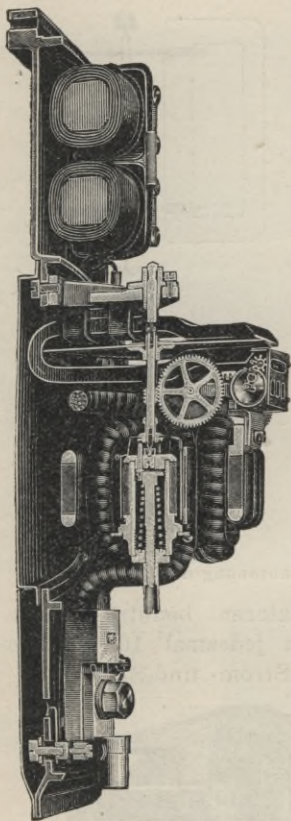


Fig. 448. Wattstundenzähler der A. E.-G. nach dem Ferraris-Prinzip.

6. Der Wechselstromzähler der Union Elektrizitäts - Gesellschaft.

Der Unionzähler¹⁾ unterscheidet sich von den vorher beschriebenen hauptsächlich durch die relative Lage der magnetischen Felder. Bei diesen Zählern stehen das vom Hauptstrom und das vom Spannungsstrom herführende Feld aufeinander senkrecht und

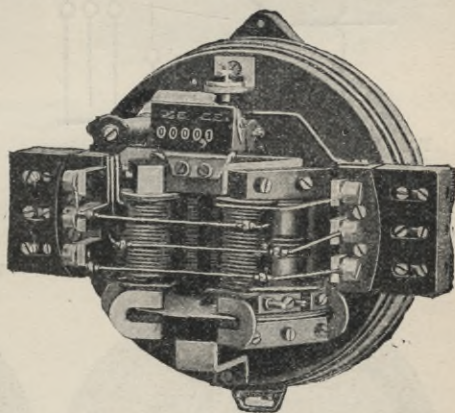


Fig. 449. Drehstromzähler der A. E.-G.

schneiden einander. Der Zähler besitzt, wie Fig. 451 zeigt, auf der Drehachse zwei parallele Aluminiumscheiben. Zwischen diesen (vgl. Fig. 451) sitzen nebeneinander drei Elektromagnete. Die äußeren beiden, H_1 u. H_2 , sind vom Hauptstrom, der mittlere N ist vom Nebenschlußstrom erregt. Der Wicklungssinn der Hauptstromspulen ist so gewählt, daß der Momentanwert des Wechselstromes die einer Aluminiumscheibe benachbarten Magnetenden im entgegengesetzten Sinne polarisiert. Der Nebenschlußelektromagnet ist durch das wicklungsfreie Eisenjoch J

¹⁾ Erfunden von R. Theiler, geschützt durch D. R.-P. 94 999, 115 534, 115 564. Eine eingehende Beschreibung dieses Zählers gibt Stern, ETZ 1902, S. 774.

magnetisch geschlossen. Die Polenden des Joches J, die nahe den Scheiben sich befinden, werden von den Hauptstromkraftlinien quer durchsetzt; an diesen Stellen findet somit ein Schneiden beider Kraftlinienzüge statt. Für die Bremsung wird außerdem ein Dauermagnet verwendet.

Der Wechselstromzähler der Union Elektrizitäts-Gesellschaft ist in Fig. 452 in äußerer Ansicht und in Innenansicht mit abgenommenem Uhrwerk abgebildet. Bei

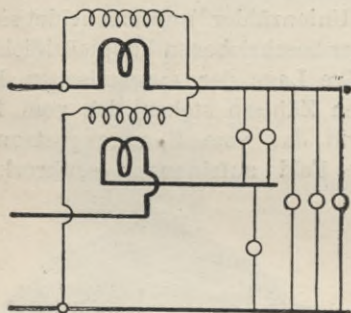


Fig. 450. Schaltung des Drehstromzählers der A. E.-G.

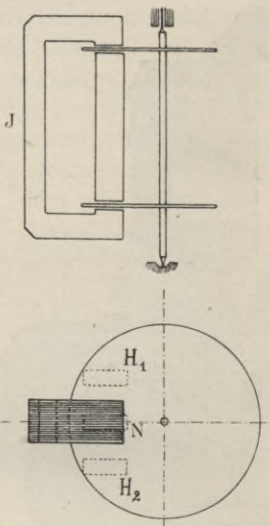


Fig. 451. Anordnung des Unionzählers.

größeren Strömen werden Stromtransformatoren benutzt, deren Sekundärwicklung bei vollem Primärstrom jedesmal 10 Ampère gibt. Bei Spannungen über 600 Volt werden Strom- und Spannungs-

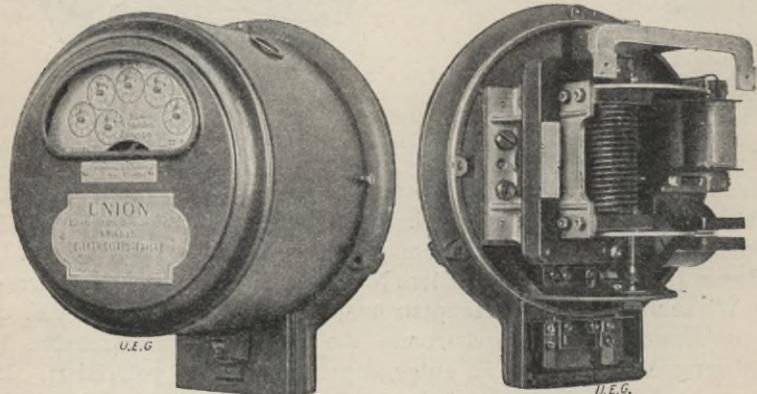
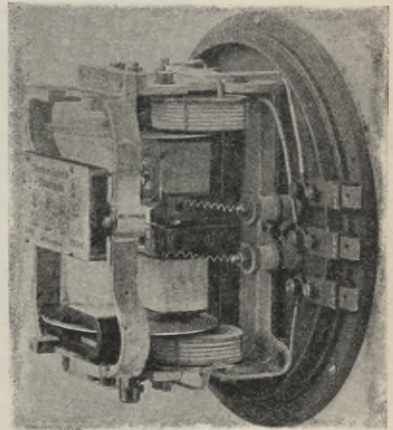
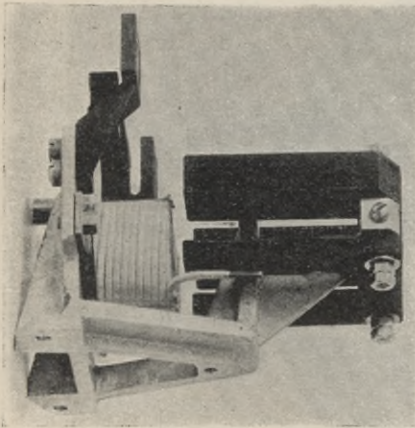


Fig. 452. Wechselstromzähler der Union E.-G.

transformatoren in ähnlicher Weise und Anordnung, wie dies auch andere Firmen tun, verwendet.

Weder die Periodenzahl, noch die Kurvenform des Stromes haben einen merklichen Einfluß. Bei einer Änderung der Spannung um 10% ändert sich die Zählerkonstante um 0,6%. Auch gegen Überlastung ist



3184.

der Zähler wenig Wattverbrauch äußerst gering, 1 Watt für je 110

Wir wollen zum weisen, daß der des Zählers immerliche Größe ist. Zähler a Watt, so im Jahre

wattstunden. Die Kilowattstunde in Elektrizitätswerk

Durchschnitt 0,10 \mathcal{M} . Der jährliche Aufwand des angeschlossenen Zähler beträgt somit $0,876 \cdot a \mathcal{M}$.

Das gibt bei mehreren Tausend Zählern schon ein erhebliches Sümmechen; aber man darf nicht vergessen, daß durch rationelle Einrichtung und gewissenhafte Bedienung der Feuerung das Vielfache dieses Betrages gespart werden kann.

7. Wechselstromzähler von Schuckert & Co.

Auch dieser Zähler ist ein Motorzähler nach dem Ferrarisschen Prinzipie. Unterhalb der leichten als Anker dienenden Scheibe liegt

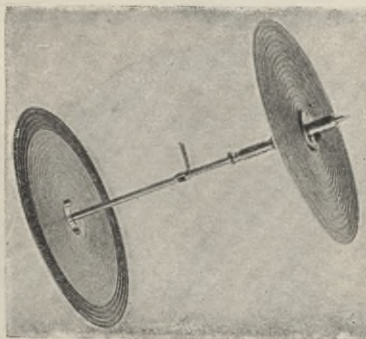


Fig. 453 a, b, c. Die einzelnen Bestandteile eines Drehstromzählers der Union.

empfindlich. Der des Zählers ist nämlich nicht ganz Volt.

Schluß darauf hin-Eigenverbrauch hin eine beachtVerbraucht ein ist der Aufwand $\frac{365 \cdot a \cdot 24}{1000}$ Kilo-

Selbstkosten einer einem größeren betragen etwa im

die Hauptstromspule (vergl. Fig. 454); dieselbe hat eine ovale Form. Oberhalb des Ankers sind, von einem T-förmigen Träger gehalten, Hufeisenmagnete angeordnet, auf welche die Nebenschlußwickelungen

aufgeschoben werden, und zwar ist ein Haupthufeisen mit großem Eisenquerschnitte und vielen Windungen und ein Hilfhufeisen mit kleinem

Eisenquerschnitte und geringerer Windungszahl vorhanden. Da das erstere direkt, das letztere unter Vorschaltung eines erheblichen induktionsfreien

Widerstandes an die Betriebsspannung

angeschlossen ist, entsteht im Haupthufeisen ein Magnetfeld mit sehr großer, im

Hilfhufeisen ein solches mit sehr geringer

Phasenverschiebung gegen die Betriebsspannung.

Durch die Wechselwirkung zwischen den Magnetfeldern der Hauptstrom-

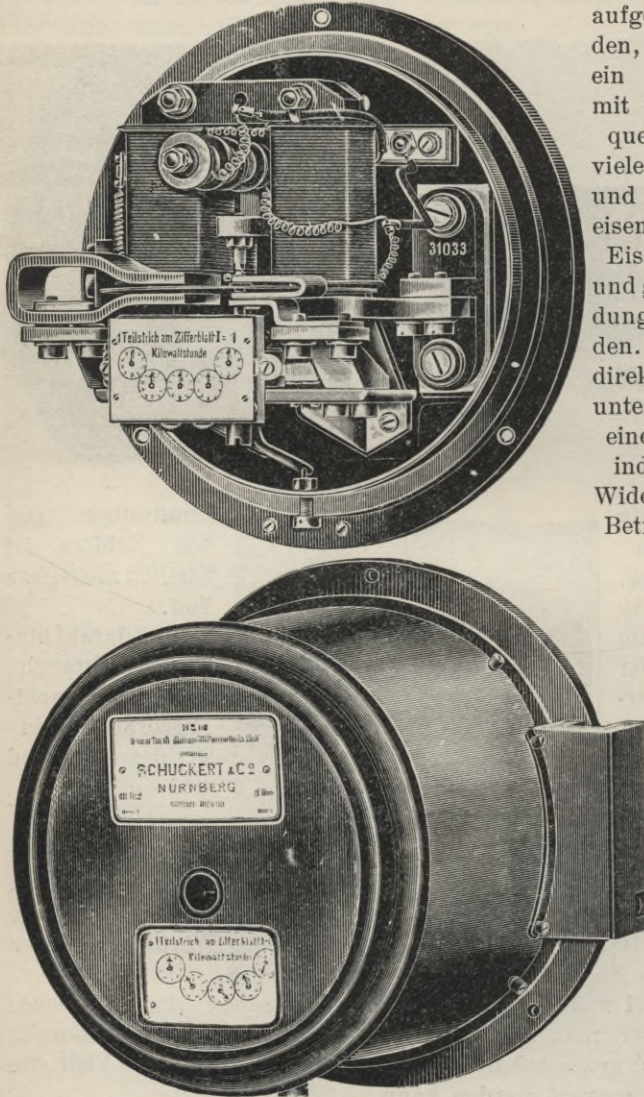


Fig. 454. Drehstromzähler von Schuckert & Co.

und Nebenschlußspule und den durch diese Felder im Anker erzeugten Wirbelströmen wird der Anker in Bewegung gesetzt. Zu beiden

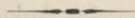
Seiten des Ankers sind ferner permanente Stahlmagnete angeordnet, welche dämpfend auf die Bewegung einwirken.

Durch die Anordnung des Hilfshufeisens erhält der R-Zähler den bedeutenden Vorzug vor vielen älteren Zählerkonstruktionen, daß er die verbrauchte Energie richtig anzeigt, auch wenn zwischen Strom und Spannung Phasenverschiebung vorhanden ist.

Fig. 454 zeigt die gesamte Einrichtung des sorgfältig durchkonstruierten und sauber ausgeführten Apparates.

Zur Messung des Stromverbrauches in Dreiphasen-Anlagen, bei welchen die Belastung nicht auf die drei Phasen gleichmäßig verteilt ist, dient der Schuckertsche Drehstromzähler, Modell FU. Dem Zähler liegt, ebenso wie den vorstehend beschriebenen Konstruktionen, das Ferrarissche Prinzip zu Grunde. Der Anker besteht dann aus zwei Aluminiumscheiben, welche auf einer gemeinsamen Achse angeordnet sind (Fig. 453 c). Auf jede der Ankerscheiben wirken zwei Hauptstromspulen und eine Nebenschlußpule.

Der Zähler gibt den wirklichen Verbrauch in allen drei Phasen zusammen direkt an; dabei ist es vollständig gleichgültig, wie die Stromverbraucher auf die drei Phasen verteilt sind und ob sie aus Glühlampen, Bogenlampen mit Drosselspulen oder Motoren bestehen.



34. Kapitel.

Das Arbeiten mit parallel geschalteten Wechselstrom- und Drehstrommaschinen.

1. Bedingungen

für das Parallelschalten von Wechselstrommaschinen.

Lange Zeit hindurch hat eine große Unklarheit darüber bestanden, wie Wechselstrom- und Drehstrommaschinen beschaffen sein müssen, damit sie bei Parallelschaltung mit gutem Synchronismus weiter laufen und keine derselben während der Arbeit auf ein gemeinsames Verteilungsnetz außer Tritt falle. Anfänglich glaubte man, daß ein gewisser, nicht zu niedrig bemessener Betrag von Selbstinduktion im Anker der zu Parallelbetrieb bestimmten Maschinen erforderlich sei; später neigten sich mehrere hervorragende Elektrotechniker der Ansicht zu, daß Maschinen um so leichter in Parallelschaltung arbeiteten, je geringer die Selbstinduktion im Anker sei. Jetzt weiß man, daß, von extremen Fällen abgesehen, die Parallelschaltung von der Größe der Selbstinduktion im Anker der Maschine nur wenig abhängt, daß aber aus wirtschaftlichen Gründen Maschinen mit geringer Selbstinduktion vorzuziehen sind.

Soll das Parallelschalten von Wechsel- oder Drehstrommaschinen ohne Störung, d. h. ohne Spannungsschwankungen im Verteilungsnetze sich vollziehen, so muß bei dem Zuschalten nicht nur die Spannung, sondern auch die Wechselzahl und endlich auch die Stromphase der neu hinzutretenden Maschine mit den entsprechenden Größen der bereits in Tätigkeit befindlichen Maschinen möglichst genau übereinstimmen. Sind die Maschinen einmal auf synchronen Lauf gebracht und parallel geschaltet, so suchen sie den synchronen Lauf beizubehalten, weil die Maschine mit dem verzögerten Stromimpuls durch die andere beschleunigt, die letztere dagegen verzögert wird.

Eine wesentliche Bedingung dafür, daß verschiedene Wechselstrommaschinen dauernd gut synchron laufen, ist die, daß die Maschinen möglichst gleich gebaut sind und die Strom- und Spannungskurven derselben nahezu gleiche Form haben.

Wenn die Antriebsmaschinen Dampfmaschinen oder Gaskraftmaschinen sind, so besitzen sie stets einen gewissen Ungleichförmig-

keitsgrad, weil der Dampfdruck in verschiedenen Stellungen der Kurbel oder des Krummzapfens mit verschiedenem Hebelarm, oft auch mit verschiedener Stärke wirkt. Über die sogenannten toten Punkte hilft ja nur die lebendige Kraft der bewegten Teile hinweg; an diesen Stellen nimmt jedesmal die Geschwindigkeit etwas ab. Bei Antriebsmaschinen mit erheblichem Ungleichförmigkeitsgrad, aber gleicher Bauart, schaltet man die Maschinen, die gleiche Spannung, gleiche Wechselzahl und gleiche Phase besitzen, in dem Augenblicke zusammen, in dem die Kurbeln gleiche Stellung haben. Man macht diesen Moment dadurch kenntlich, daß man die Kurbeln in einer bestimmten Stellung ein Glockensignal anschlagen läßt.

Eine weitere Schwierigkeit liegt darin, daß die eine zuzuschaltende Maschine zunächst unbelastet läuft, während die anderen Maschinen bereits belastet sind, und die Regulatoren der Dampfmaschinen oder Turbinen nur dann auf die Innehaltung der angenommenen Umlaufzahl wirken, wenn die Arbeit abgebenden Maschinen bereits eine bestimmte nicht zu geringe Belastung haben. Man kann daher, wenn nur Zentrifugalregulatoren die Geschwindigkeit der Antriebsmaschinen ändern, die Belastung der einzelnen Wechselstrommaschinen nicht willkürlich ändern, ohne den Synchronismus des Systems zu gefährden.

Man versieht daher z. B. nach einem der Firma Siemens & Halske durch das D. R.-P. No. 72282 geschützten Verfahren die Zentrifugalregulatoren der Antriebsmaschinen mit Verstellvorrichtungen, die von einem Elektromotor bewegt werden, den man vom Schaltbrett aus in der einen oder in der entgegengesetzten Richtung zum Anlaufen bringt. Dadurch wird es ermöglicht, daß die Zentrifugalregulatoren bei derselben Geschwindigkeit der Maschinen je nach Bedarf eine größere oder geringere Menge Dampf oder Wasser zuführen.

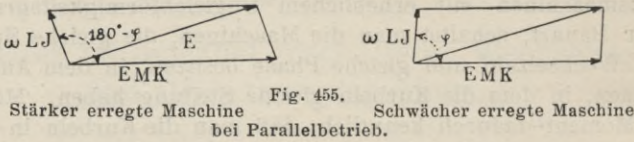
Die Verstellung der Zentrifugalregulatoren kann auf verschiedene Weise bewerkstelligt werden. Man kann z. B. auf den Zentrifugalregulator einen Hebelarm einwirken lassen, an dem eine Feder befestigt ist, die durch ihre größere oder geringere Spannung der Zentrifugalkraft stärker oder schwächer entgegenwirkt. Oder man kann auf einem Hebelarm ein Laufgewicht beweglich anbringen, das durch die Umdrehung eines Elektromotors vor- oder rückwärts geschoben wird; dadurch wird dann der Druck verändert, mit dem der Hebel auf den Regulator einwirkt.

2. Die Ausgleichsströme parallel laufender Maschinen.

Sind die Maschinen bereits in Parallelschaltung tätig, sind aber die EMKräfte derselben infolge ungleicher Erregung verschieden, so

entsteht zwischen beiden Maschinen ein Ausgleichsstrom, durch den die Klemmenspannungen beider Maschinen gleich gemacht werden.

In Fig. 455 stellt das links gelegene Diagramm die Spannungsverhältnisse der stärker erregten, das rechts gelegene die Spannungsverhältnisse der schwächer erregten Maschine dar. Die Klemmen-



spannungen E sind bei beiden gleich und haben wegen der Phasengleichheit gleiche Richtung.

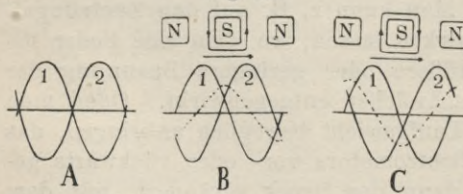
Da die Selbstinduktion im Vergleich zum Ohmschen Widerstande groß ist, weichen φ und $180 - \varphi$ beide nicht viel von 90° ab. Der durch ungleiche Erregung verursachte Ausgleichsstrom ist daher vorzugsweise wattlos.

Läuft dagegen die eine Maschine etwas langsamer als die andere, sind aber die Erregungen gleich, so besitzt die rascher laufende Maschine eine größere EMK als die langsamer laufende. Dann fließt ein Ausgleichsstrom, der die langsamer laufende Maschine als Motor beschleunigt. Dieser Ausgleichsstrom, der eine Arbeit leistet, ist vorzugsweise ein Wattstrom.

Bei Betrieb parallel geschalteter Wechselstrommaschinen, die durch verschiedene Antriebsmaschinen bewegt werden, entsteht oft infolge der Ungleichförmigkeitsgrade der Maschinen und der dadurch bedingten periodischen Veränderlichkeit des Drehmomentes ein pendelnder Ausgleichsstrom, der bald von der einen, bald von der anderen Wechselstrommaschine ausgeht.

Wenn wir zwei galvanische Elemente in Parallelschaltung auf einen äußeren Widerstand arbeiten lassen, so müssen in dem geschlossenen Stromkreise, der aus den beiden Elementen und ihren Zuleitungen besteht, die EM Kräfte entgegengesetzt gerichtet sein (vergl. Gleichstromtechnik Kap. I, 23, S. 25, in Fig. 9 den Stromkreis $E'B'E''A''$);

Fig. 456.



Wechselstrommaschinen in Phase.

Maschine 2 verzögert, das Feld wird geschwächt.

Maschine 2 in Voreilung, das Feld wird verstärkt.

ebenso müssen die Phasen zweier Wechselstrommaschinen, die auf denselben äußeren Leiterkreis gemeinsam in Parallelschaltung arbeiten sollen, gerade eine Phasendifferenz von 180° oder π besitzen (vergl. Fig. 456 A).

Wenn dagegen die Spannungen nicht in Phase sind, z. B. die Maschine 2 gegen 1 zurück bleibt, so ist zwischen den beiden Maschinen eine EMK tätig, eine Wechselfpannung, die Resultante der beiden Spannungen, die in Fig. 456 B durch die gestrichelte Linie dargestellt wird. Der durch diese Resultante hervorgerufene Ausgleichsstrom schwächt das Feld der den Spulen gegenüberstehenden Pole. Die Schwächung des Feldes erniedrigt die EMK der Maschine 2 und deren Strom; die Maschine 2 leistet daher weniger Arbeit und wird infolgedessen von dem zu ihrem Antriebe dienenden Motor beschleunigt. Ist dagegen die Maschine 1 in der Phase verzögert gegen 2, so entsteht als Resultierende der beiden EMKkräfte eine Wechselfpannung (die punktierte Linie in Fig. 456 C), die in den vor den Polen stehenden Ankerspulen einen Ausgleichsstrom hervorruft, der das Feld verstärkt. Spannung und Stromstärke der Maschine werden dadurch vergrößert und ebenso die dadurch beanspruchte Energieaufnahme, die Folge also ist, da die Antriebsmaschine nicht so rasch ihre Leistung ändern kann, daß die Geschwindigkeit, mit der sich die Feldpole bewegen, abnimmt.

Die Ausgleichströme besitzen somit stets eine synchronisierende Tendenz und daher kommt es, daß die Maschinen von selbst Synchronismus annehmen, wenn sie auch bei nicht absolut entgegengesetzter Phase unter sich, d. i. gleicher Phase in bezug auf den äußeren Stromkreis, zusammengeschaltet werden.¹⁾

3. Abschalten

einer in Parallelbetrieb befindlichen Wechselstrommaschine.

Der Vorgang, der dem Abschalten einer der in Parallelschaltung tätigen Wechselstrom- oder Drehstrommaschinen vorhergeht, ist etwa der folgende:

Bei Abnahme der Belastung stellen die Zentrifugalregulatoren sämtlicher Antriebsmaschinen den geringeren Zufluß an Dampf oder Wasser dadurch her, daß sie auf höhere Geschwindigkeit einstellen. Darauf werden die Regulatoren vom Schaltbrett aus so verstellt, daß sie die geringere Zufuhr an Dampf oder Wasser bei der alten Geschwindigkeit gestatten. Gleichzeitig schwächt man durch Einschalten von Widerstand in den Erregerstromkreis die Erregerstromstärke der Wechselstrommaschinen derart, daß die durch die verminderte Belastung erhöhte Spannung der Maschinen auf den am Stationsvolt-

¹⁾ Eine eingehende analytische Theorie der Parallelschaltung von Wechselstrommaschinen hat Blondel in dem Aufsätze: *Couplage et synchronisation des alternateurs*, *Lumière Électrique*, Bd. XLVI, gegeben. Kapp hat eine sehr anschauliche graphische Darstellung durch Vektorendiagramme entwickelt in seinem Werke: *Dynamomaschinen für Gleich- und Wechselstrom*, Berlin, Springer, S. 273.

meter vorgeschriebenen Wert zurückgeht. Solche Verminderungen der Erregerstromstärke aller Maschinen bewirkt man entweder durch Vergrößerung des allen Erregerstromkreisen gemeinsamen Widerstandes R (Fig. 457), oder man kuppelt die Widerstände r aller Maschinen durch eine den Bühnenregulatoren der Theater ähnliche Vorrichtung und verstellt dieselben durch einen Handgriff alle gleichzeitig.

Will man eine der Wechselstrommaschinen ausschalten und die zugehörige Antriebsmaschine abstellen, so verändert man den Regulator der zugehörigen Antriebsmaschine derart, daß die Dampfzufuhr oder, wenn es eine Turbine ist, die Beaufschlagung nach und nach kleiner wird. Die Geschwindigkeit der Maschine ändert sich dabei aber nicht. Da der Synchronismus zunächst erhalten bleibt, ist eine

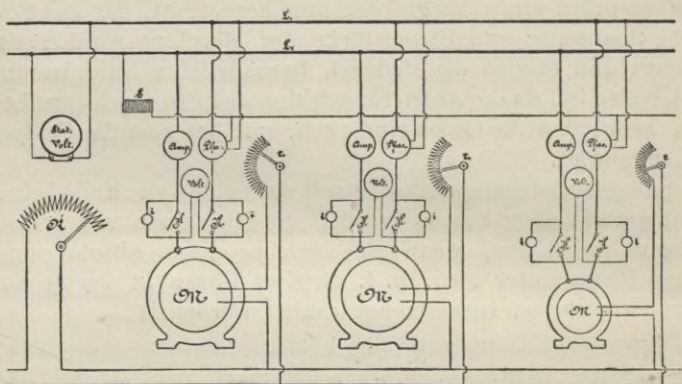


Fig. 457. Betrieb mit parallel geschalteten Wechselstrommaschinen.

merkliche Geschwindigkeitsänderung auch nicht zu befürchten. Die Leistung der Maschine aber und ihre Stromstärke wird kleiner und kleiner. Sowie die Leistung am Wattmeter oder die Stromstärke am Ampèremeter null wird, was man vollends durch Schwächung der Erregung, also durch Vergrößerung des Widerstandes r der betreffenden Maschine erreicht, schaltet man durch Öffnen der Hauptausschalter HH die Maschine ab und stellt die Antriebsmaschine auf Ruhe.

4. Zuschalten einer neuen Maschine.

Will man zu in Betrieb befindlichen Maschinen eine neue hinzuschalten, so setzt man die zugehörige Antriebsmaschine in Bewegung und erhöht die Umdrehungszahl durch Steigerung der Zufuhr von motorischer Substanz mehr und mehr. Hierauf sendet man einen Erregerstrom von der erforderlichen Stärke durch die Feldmagneten und macht die Maschinenspannung gleich der Netzspannung. Wenn die Umlaufzahl der Wechselstrommaschine nahezu die normale Höhe

erreicht hat, schaltet man den Phasenanzeiger ein und schließt in dem Augenblicke, in dem die Spannung und die Phase der zuzuschaltenden Maschine der des Netzes gleich ist, den Hauptausschalter.

Durch Erhöhung der Zufuhr an motorischer Substanz belastet man dann die zugeschaltete Maschine nach Bedarf mehr und mehr.

Die beiden Hilfsvorrichtungen, die hierbei zur Anwendung kommen, die Verstellvorrichtung für die Zentrifugalregulatoren und der Phasenvergleich, sollen im Anschluß hieran sofort beschrieben werden. Wir wollen hier nur noch erwähnen, daß bei Benutzung der Vorrichtung von Siemens & Halske, deren Wirksamkeit wir in Abschnitt 5 dieses Kapitels näher beschreiben, das Zu- und Abschalten von Wechselstrom- und Drehstrommaschinen auch ohne Hinzunahme von Belastungswiderständen geschehen kann.

Andere Firmen verfahren dagegen vielfach so, daß sie große induktionsfreie Belastungswiderstände in ihren Wechselstromanlagen aufstellen, deren einzelne Teile je nach Bedarf vom Schaltbrett aus durch eine Art Klaviatur eingeschaltet, ausgeschaltet oder parallel geschaltet werden können.

Beim Hinzufügen einer neuen Maschine lassen sie diese zunächst auf den Belastungswiderstand arbeiten und steigern durch Vermehrung der Dampfzufuhr und Verstärken des Erregerstromes die Spannung und die Belastung bis zur normalen Höhe. Wenn die Periodenzahl der Maschine ziemlich genau mit der der übrigen Maschinen übereinstimmt, wird der Phasenvergleich eingeschaltet. Zeigt derselbe an, daß beide Maschinen in gleicher Phase sind, so wird der Hauptausschalter HH (Fig. 457), der die Verbindung mit den Sammelschienen herstellt, geschlossen.

Wenn die neue Maschine nun synchron mit den übrigen weiter läuft, wird in dem Maße, als die Belastung im Verteilungsnetz mehr und mehr wächst, allmählich der Belastungswiderstand herausgenommen, indem man durch Herausnahme parallel geschalteter Widerstände den Hilfswiderstand allmählich immer größer macht. Durch Beobachtung des Phasenmessers erkennt man gleichzeitig, in welchem Sinne dabei etwa der Erregerstrom zu verändern ist. Schließlich entfernt man den Belastungswiderstand ganz und verteilt die Leistung möglichst zweckmäßig auf alle im Gange befindlichen Maschinen derart, daß keine derselben einen Rückstrom aus dem Netze empfängt.

Bei Abnahme der Belastung verfährt man dann genau umgekehrt. Man belastet die abzuschaltende Maschine mehr und mehr mit Belastungswiderstand und vermindert die Erregerstromstärke so lange, bis das Ampèremeter, das zwischen den Sammelschienen und dieser Maschine angeordnet ist, gerade auf null zeigt. In diesem Momente öffnet man den Hauptausschalter und läßt nun Geschwindigkeit, Strom

und Spannung allmählich bis auf null sinken. Dann löst man den Belastungswiderstand von der zur Ruhe gelangten Maschine ab, um ihn in gleicher Weise für die Stillsetzung des nächsten Maschinenaggregates zu verwenden.

Da für größere Maschinen diese Hilfswiderstände außerordentlich voluminös und kostspielig sind, bedient man sich neuerdings zur künstlichen Belastung auch der Wirbelstrombremse von Dettmar¹⁾ (vergl. Fig. 458).

Man stellt vor das Schwungrad der Antriebsmaschine einen Elektromagneten, der durch Gleichstrom erregt wird. Da die Metallmasse

des Schwungrades sich mit großer Geschwindigkeit vor dem Polschuhe vorbeibewegt, so entstehen in derselben kräftige Wirbelströme, wodurch die Bewegung des

Schwungrades gehemmt und eine Wirkung wie durch eine künstliche Belastung ausgeübt wird. Wenn man Spannung, Geschwindigkeit, Phase der einzuschaltenden Maschine bereits gleich gemacht hat, stellen sich alsdann auch die Regulatoren

Fig. 458. Dettmars Wirbelstrombremse als künstliche Belastung.

der Antriebsmaschine der Belastung entsprechend ein. Wenn man dann die neue Maschine zugeschaltet und durch Schwächung des den Elektromagneten umfließenden Stromes die Bremswirkung allmählich verkleinert, übernimmt in gleichem Verhältnis die neu eingeschaltete Maschine den ihr zukommenden Teil der Belastung des Netzes.

Zumal wenn Gasmotoren oder Dieselmotoren als Antriebsmaschinen benutzt werden, hat sich diese Art der künstlichen Belastung als sehr zweckmäßig erwiesen.

5. Die Verstellvorrichtung der Zentrifugalregulatoren.

Wir beschreiben im nachfolgenden beispielsweise diejenige Form der Ausführung dieser für Parallelschaltung von Wechselstrommaschinen sehr zweckmäßigen Einrichtung, wie sie von Siemens & Halske bei der elektrischen Zentrale mit Drehstrom in Chemnitz und in ähnlicher Ausführungsform bei mehreren anderen Elektrizitätswerken zur Anwendung gekommen ist.

¹⁾ ETZ 1899, S. 725.

An jeder Säule, die den Zentrifugalregulator der Betriebsdampfmaschine trägt, ist ein kleiner Elektromotor befestigt, der vom Schalt-

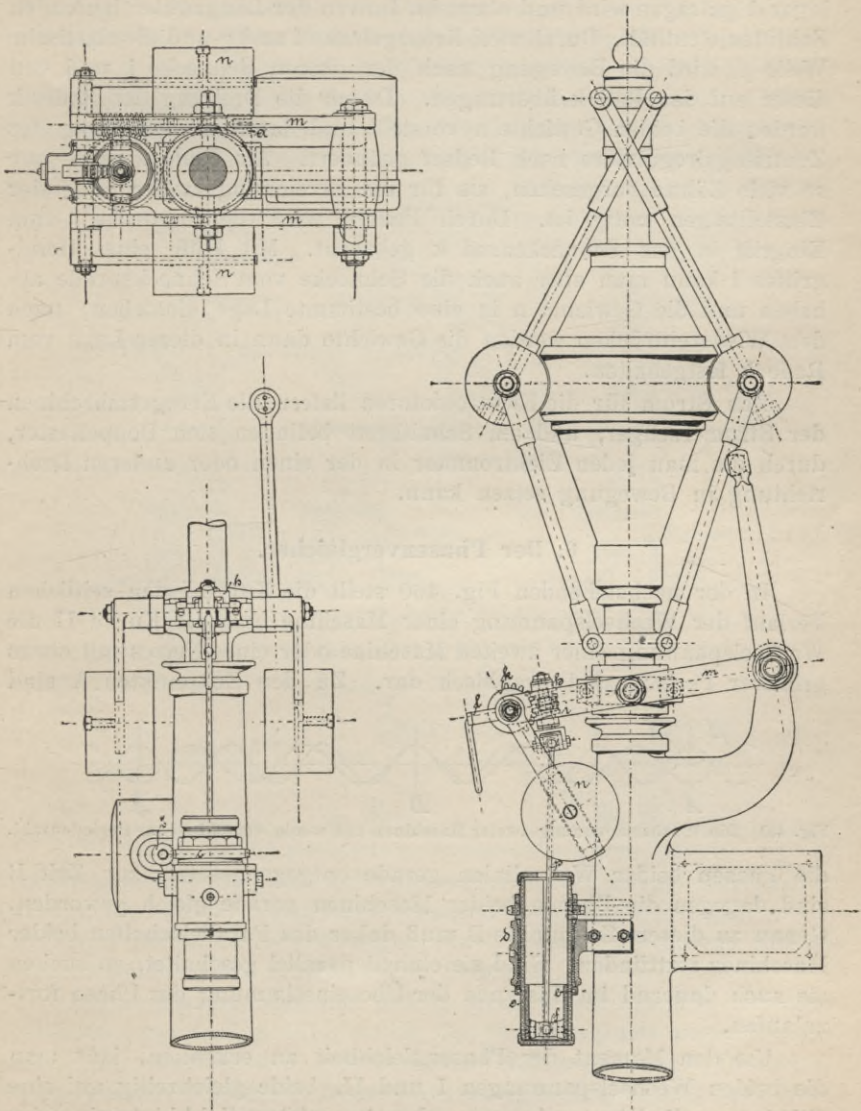


Fig. 459. Steuervorrichtung von Siemens & Halske für Dampfmaschinen, die parallel geschaltete Wechselstrommaschinen antreiben.

brett der Zentrale aus angelassen und umgesteuert werden kann. Auf der Motorwelle a (vergl. Fig. 459) ist eine Schnecke befestigt, Rühlmann, Wechselstrom.

durch die das Schneckenrad *c* in Umdrehungen versetzt wird. Dieses Schneckenrad *c* sitzt auf einer längeren Büchse, die von einem Halslager *d* getragen wird und einen im Innern der Längsnuten laufenden Schlitten *e* enthält. Durch zwei Kreuzgelenke *f* und *g* und die elastische Welle *p* wird die Bewegung nach der oberen Schnecke *i* und von dieser auf das Rad *k* übertragen. Durch die Drehung des Rades *k* werden die beiden Gewichte *n* verstellt und damit die Belastung des Zentrifugalregulators nach Bedarf geändert. Am Rade *k* sind nur so viele Zähne vorgesehen, als für die Erreichung zweier äußerster Einstellungen nötig ist. Durch Federn wird die Schnecke *i* zum Eingriff in das Schneckenrad *k* gebracht. Mit Hilfe eines Handgriffes *l* kann man aber auch die Schnecke vom Schneckenrade abheben und die Gewichte *n* in eine bestimmte Lage einstellen; nach dem Wiedereintrücken werden die Gewichte dann in dieser Lage vom Rade *k* festgehalten.

Den Strom für die Elektromotoren liefern die Erregermaschinen der Stromerzeuger, und am Schaltbrett befinden sich Doppeltaster, durch die man jeden Elektromotor in der einen oder anderen Drehrichtung in Bewegung setzen kann.

6. Der Phasenvergleichler.

In der nachstehenden Fig. 460 stellt die Kurve I den zeitlichen Verlauf der Wechselspannung einer Maschine und die Kurve II die Wechselspannung einer zweiten Maschine oder eines Netzes mit etwas größerer Periodenzahl graphisch dar. Zu den Zeitpunkten A sind

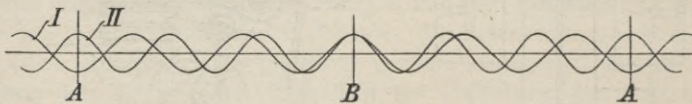


Fig. 460. Die Wechselspannung zweier Maschinen mit wenig verschiedener Periodenzahl.

die Phasen beider Wellenlinien gerade entgegengesetzt, zur Zeit B sind dagegen die Phasen beider Maschinen gerade gleich geworden. Genau zu diesem Zeitpunkte B muß daher das Parallelschalten beider Maschinen stattfinden. Sind sie einmal parallel geschaltet, so suchen sie auch dauernd im Zustande der Übereinstimmung der Phase fortzulaufen.

Um den Moment der Phasengleichheit zu erkennen, läßt man die beiden Wechselspannungen I und II, beide gleichzeitig auf eine Glühlampe, die Phasenlampe, oder eine größere Zahl hintereinander geschalteter Lampen wirken. Diese Lampe wird abwechselnd aufleuchten und dunkel werden, je nachdem die beiden Spannungen sich addieren oder sich aufheben.

Ist die Betriebsspannung hoch, so schließt man die Leitungen an die Primärwickelungen zweier kleiner, gleichgroßer Transformatoren an und schaltet die Phasenlampe zwischen die hintereinander geschalteten sekundären Wickelungen dieser Reduktionstransformatoren.

Um nun den Gebrauch des Phasenvergleichers zunächst für die Parallelschaltung von Drehstrommaschinen zu erläutern, teilen wir nach einer kleinen Schrift von Siemens & Halske¹⁾ das Schaltungsschema für drei Drehstrommaschinen mit, deren Feldmagnete von

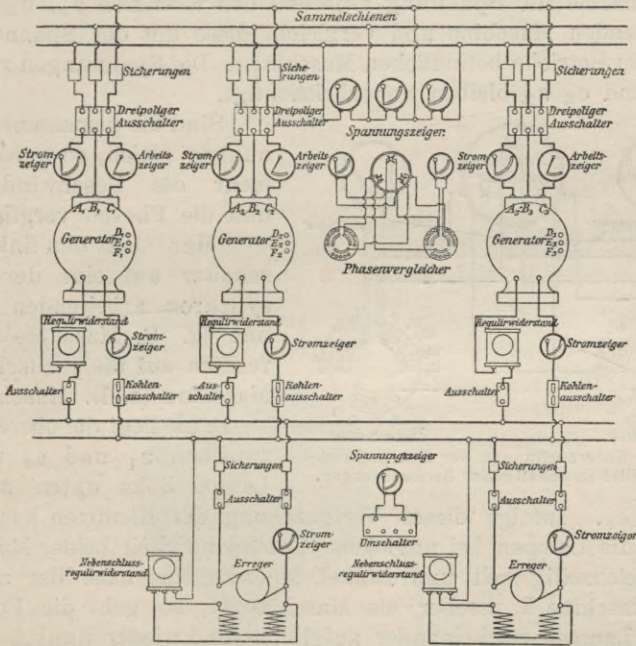


Fig. 461. Parallel geschaltete Drehstrommaschinen nebst Zubehör.

zwei Sammelschienen aus den erforderlichen Gleichstrom empfangen. (Vergl. Fig. 461.) An diese Gleichstrom-Sammelschienen geben, der größeren Betriebssicherheit wegen, zwei parallel geschaltete Gleichstrommaschinen den erforderlichen Strom ab.

Die Drehstrommaschinen liefern ihren Strom an drei Sammelschienen (oben in Fig. 461), an die das Verteilungsnetz angeschlossen ist. Die verschiedenen erforderlichen Meßinstrumente: Voltmeter, Ampèremeter, Wattmeter, ferner Phasenvergleichler, Ausschalter, Bleisicherungen, Regulierwiderstände und sonstiges Zubehör sind angedeutet.

¹⁾ Siemens & Halske, Anweisung 3 zum Parallelschalten von Drehstrom- und Wechselstrommaschinen, Berlin, Juni 1896.

Handelt es sich um Wechselstrom, so fallen die von B und E ausgehenden Leitungen und die in diese Leitungen eingeschalteten Instrumente in der ganzen Anlage weg. Sind die von den Maschinen erzeugten Spannungen niedrig, so werden die Klemmen A_1, B_1, C_1 , ferner A_2, B_2, C_2 und A_3, B_3, C_3 unmittelbar mit den Klemmen $a_1, b_1, c_1, a_2, b_2, c_2, a_3, b_3, c_3$ usw. der in Fig. 462 besonders dargestellten doppelpoligen Umschalter verbunden.

Mit dem rechts in Fig. 462 angedeuteten Spannungszeiger mißt man zunächst die Spannung zwischen den Klemmen a_n, b_n der zuzuschaltenden Maschine und vergleicht diese mit der Spannung der bereits im Betriebe befindlichen Maschinen. Die Spannungen zwischen b_n, c_n und c_n, a_n bleiben unberücksichtigt.

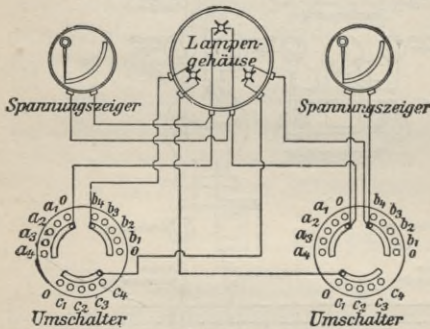


Fig. 462. Untersuchungen der Phasengleichheit parallel zu schaltender Stromerzeuger.

b_1 und c_2 . Infolge dieser Vertauschung der Klemmen b_2 und c_2 werden die Lampen bei ungleicher Geschwindigkeit beider Maschinen nicht gleichzeitig hell und dunkel, sondern eine nach der anderen. Läuft Maschine I rascher als Maschine II, so geht die Folge, in der die Lampen nacheinander aufglühen und wieder dunkel werden, in der Uhrzeigerrihtung. Läuft die Maschine II rascher als I, so geht die Folge des Aufleuchtens entgegengesetzt dem Uhrzeiger.¹⁾

Bei annähernder Gleichheit der Umlaufzahlen beider Maschinen ist die Richtung der Drehung des Aufleuchtens sehr gut zu verfolgen.

Wenn Lampen L', L'', L''' an die drei Enden xx', yy', zz' der drei in Sternspannung geschalteten Phasenwickelungen angeschlossen wären, würden sie alle drei gleichzeitig hell und dunkel werden. Wenn man jedoch die Lampen an die Enden xx', yz', zy' anlegt, leuchten sie nacheinander in der Richtung des Uhrzeigers auf, wenn die zu-

Sind die gemessenen Spannungen gleich, so werden nunmehr die Geschwindigkeiten und die Phasen verglichen.

Man stellt den linken Umschalter auf eine der bereits synchron arbeitenden Maschinen (z. B. Maschine I), den rechten auf die zuzuschaltende Maschine (z. B. Maschine II).

Dann liegt die obere Lampe zwischen a_1 und a_2 und die Lampe links unten zwischen

¹⁾ Die Einrichtung mit den abwechselnd aufleuchtenden Lampen hat zuerst Michalke, ETZ 1896, S. 573 angegeben. Neuerdings wird, um die Drehrichtung des Aufleuchtens noch besser sichtbar zu machen, in die Mitte des Lampengehäuses noch eine Pyramide mit polygonaler Grundfläche gestellt.

zuschaltende Maschine zu langsam geht; sie kommen dagegen in entgegengesetzter Richtung zum hellen Aufleuchten, wenn die zuzuschaltende Maschine zu rasch läuft (vergl. Fig. 463).

Man wartet nun den Augenblick ab, in dem die oberste Lampe, »die Phasenlampe«, dunkel ist und der zu ihr parallel geschaltete linke Spannungszeiger auf null zeigt. In diesem Moment stimmen die Phasen der beiden diese Lampen im entgegengesetzten Sinne durchfließenden

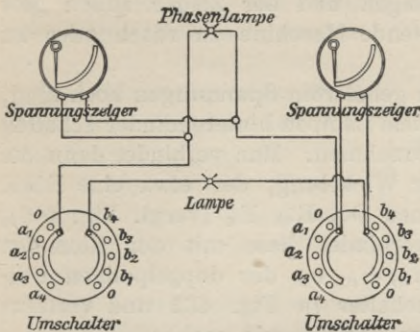


Fig. 463. Untersuchungen der Phasengleichheit parallel zu schaltender Stromerzeuger.

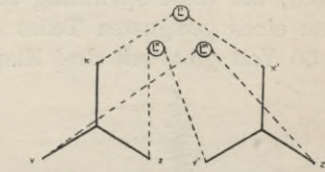


Fig. 464. Schaltung der drei Lampen, damit sie die Geschwindigkeitsdifferenz anzeigen.

Wechselströme überein, und man kann, falls auch die Spannungen der Maschinen gleich groß sind, die Einschaltung der neuen Maschine vornehmen, ohne daß eine Störung in der Betriebsspannung eintritt.

Da die Lampen in der Zwischenzeit, an den Punkten AA in Fig. 460, mit der Summe der Spannungen, also der doppelten Spannung aufleuchten, müssen dieselben für die doppelte Betriebsspannung gewählt oder zwei für die Betriebsspannung bestimmte Lampen hintereinander geschaltet werden.

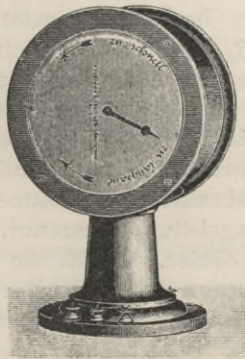
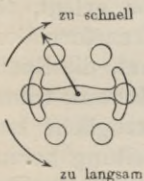


Fig. 465. Anzeiger der Geschwindigkeit der zuzuschaltenden Maschine nach Benischke.

Benischke¹⁾ hat in derselben Weise, wie die drei Lampen, drei Paare von Elektromagneten auf einer Kreisperipherie angebracht und darüber einen Eisenkörper angeordnet, der einen Zeiger trägt (vergl. Fig. 465).

¹⁾ Benischke, Der Parallelbetrieb von Wechselstrommaschinen, Friedr. Vieweg & Sohn, Braunschweig, S. 46.

Der Eisenkörper wird durch eine elastische Feder für gewöhnlich, wenn beide Maschinen gleich rasch laufen, in vertikaler Lage gehalten, der Zeiger steht dann horizontal.

Ändert sich die Magnetisierung der Spulen nacheinander in dem einen Sinne, so sucht der Eisenkörper der Drehrichtung der wachsenden Magnetisierung zu folgen und der Zeiger außen gibt unmittelbar an, ob die zuzuschaltende Maschine zu rasch oder zu langsam läuft.

Wenn die von den Maschinen gelieferten Spannungen hoch sind, würde man unter Umständen zu viele Lampen hintereinander schalten müssen, um diese Spannung aufzunehmen. Man verbindet dann die Enden eines geeigneten Teiles der Wickelung, der etwa eine EMK von 50 Volt gibt, mit drei Klemmen D_n , E_n , F_n (vergl. Fig. 466),

verbindet diese mit den Klemmen a_n , b_n , c_n der doppelpoligen Umschalter in Fig. 462 und verfährt im übrigen wie vorher.

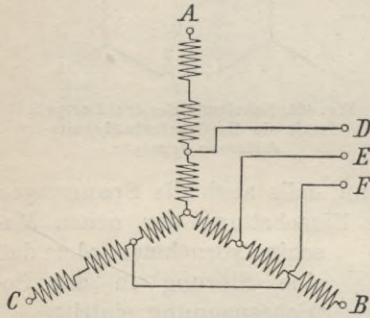


Fig. 466. Schaltung bei Maschinen, die hohe Spannung geben.

Vielfach wird auch, um jede Möglichkeit einer Berührung von Stellen, die hohe Spannung führen, auszuschließen, zwischen die Punkte D_n , E_n , F_n und a_n , b_n , c_n ein Drehstromtransformator gelegt, ein sogenannter Isolationstransformator, der nicht den Zweck hat, die Spannung auf eine andere Höhe zu transformieren, sondern vorzugsweise dazu dient eine vorzügliche Isolation zwischen der Maschinenwicklung und der Meßleitung herzustellen.

Auf diese Weise sind allerdings Voltmeter und Phasenlampe von der Hochspannungsleitung getrennt, nicht aber die Strommesser, Wattmeter und Zähler. Durch die Einführung eines Meß- oder Isolationstransformators wird außerdem die zur Messung verwendete Spannung gegen die Hauptspannung etwas in der Phase verschoben.

Das Einschalten von Synchronmotoren erfolgt in derselben Weise wie das Parallelschalten von Maschinen, indem man den Motor zunächst möglichst genau durch eine fremde Kraft auf die Geschwindigkeit des Synchronismus bringt. Um hierbei an dem Umschalter die erforderliche niedrige Spannung zu erhalten, muß man einerseits an die Klemmen der Motoren, andererseits an die Fernleitung einen Reduktionstransformator anschließen. Die Anordnung beim Phasenvergleich und das Verfahren beim Einschalten des Motors ist genau so wie beim Parallelschalten von Stromerzeugern. Das Abschalten

von Synchronmotoren erfolgt erst, nachdem die Belastung derselben zuvor auf null gebracht worden ist.

Für einfache Wechselstromanlagen kann die Einrichtung wesentlich vereinfacht werden; sie besteht dann nur (vergl. Fig. 467) aus einem Spannungszeiger, zwei Glühlampen und zwei zweipoligen Mehrfachumschaltern.

Der Spannungszeiger dient sowohl zum Vergleich der Maschinenspannungen, als auch zum Erkennen der Phasengleichheit der einzuschaltenden mit der im Betriebe befindlichen Maschine.

Einer der Umschalter wird auf 0 gestellt und durch den anderen die Verbindung mit der zu messenden Maschine hergestellt. Für das Beobachten der Phasengleichheit wird je einer der beiden Umschalter mit den zu vergleichenden Maschinen verbunden. Wenn die Glühlampen, durch die wieder beide Wechselströme in entgegengesetzter Richtung fließen, etwa $\frac{1}{4}$ bis $\frac{1}{2}$ Minute dunkel bleiben, wird in der Mitte dieses Zeitraumes, wenn der Spannungszeiger auf null zeigt, durch Schließen der Hauptauschalter das Parallelschalten der Maschinen vollzogen.

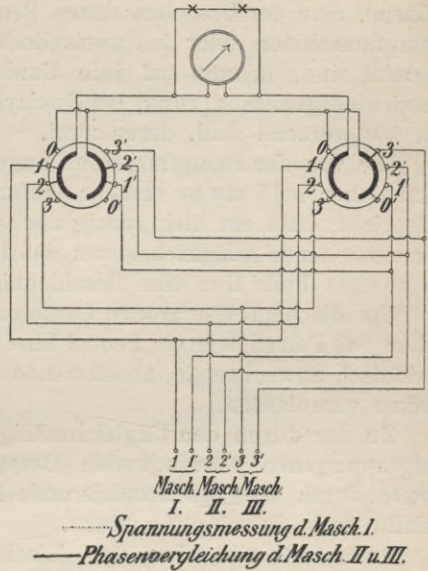


Fig. 467. Phasenvergleichung bei einfachem Wechselstrom.

7. Das Pendeln parallel geschalteter Wechselstrommaschinen.

Häufig bemerkt man an den Strom- und an den Arbeitsmessern parallel geschalteter Maschinen ein unruhiges Hin- und Herschwanen der Zeiger, welches periodisch ab- und zunimmt und darauf hindeutet, daß Ausgleichsströme von periodisch veränderlicher Größe zwischen der betreffenden Maschine und dem Netze fließen.

Besonders deutlich treten solche Erscheinungen, die man das Pendeln parallel geschalteter Maschinen nennt, dann auf, wenn zu Maschinen, die etwa durch Turbinen angetrieben werden, eine Maschine parallel geschaltet wird, die etwa von einer direkt gekuppelten Dampfmaschine angetrieben wird.

Bei Riemen- und Seilübertragungen oder elastischen Kuppelungen treten diese Erscheinungen in viel geringerer Stärke auf, weil die

wechselnde Spannung und das Gleiten des Riemens Ungleichförmigkeiten im Gange der Maschinen auszugleichen imstande ist.

Wir haben schon angedeutet, daß die periodischen Ungleichheiten der Geschwindigkeit, die jeder Dampfmaschine naturgemäß anhaften müssen, eine der Ursachen dieses Pendelns sind. Bei einzylindrigen Dampfmaschinen oder bei zweizylindrigen, deren Kurbeln um 180° versetzt sind, kommt auf jede Umdrehung eine volle Periode der Geschwindigkeitsänderung, bei Zweizylindermaschinen, deren Kurbeln um 90° versetzt sind, deren zwei.

Die von der Dampfmaschine angetriebene Wechselstrommaschine wird daher bald etwas rascher laufen, als dem synchronen Gange entspricht, bald ein klein wenig zurückbleiben. Im ersten Falle wird der entstehende Ausgleichsstrom das Polrad zurück zu ziehen suchen, im zweiten Falle ihm eine Beschleunigung erteilen.

Um die dem synchronen Laufe entsprechende Mittelstellung wird daher das Polrad wie ein Pendel hin- und herschwingen und dadurch periodisch anwachsende, abnehmende und sich umkehrende Ausgleichströme veranlassen.

Zu der durch den Ungleichmäßigkeitsgrad der Antriebsmaschine aufgezwungenen schwingenden Bewegung kommt also noch eine zweite durch die synchronisierende Kraft der Ausgleichströme veranlaßte freie Schwingung hinzu.

Außerdem gibt aber eine Wechselstrommaschine mit Phasenverschiebung nicht gleichmäßig elektrische Energie nach außen ab, sondern auch diese Energieabgabe schwankt mit der Periode des Wechselstromes (vergl. Kap. 11, 13., S. 162).

Endlich kommen noch Torsionen der Wellen mit ins Spiel, die infolge der Ungleichmäßigkeit des Drehmomentes zur Entstehung von Schwingungen Anlaß geben können.

Das tanzende Hin- und Herschwingen sehr empfindlicher Regler bei konstanter Belastung der Antriebsmaschinen kann in seltenen, besonders ungünstigen Umständen auch das Pendeln der Wechselstrommaschinen begünstigen. Bei Parallelbetrieb wird man daher sehr empfindliche Regler nicht verwenden.¹⁾

Durch Übereinanderlagerung verschiedener Schwingungen und deren Interferenz können nun nicht nur regelmäßige Pendelungen des Polrades um die dem Synchronismus entsprechende Stellung, sondern in besonders ungünstigen Fällen so weite Verschiebungen eintreten, daß die Feldpole aus dem Wirkungskreise der Spulen, auf die sie induzierend wirken sollen, in den Wirkungskreis benach-

¹⁾ Man vergleiche die Inauguraldissertation von F. Thümmeler, Fliehkraft- und Beharrungsregler. Berlin 1903.

barter Spulen eintreten, dann fällt die Maschine außer Tritt und Ausgleichströme von großer Stärke geben zu ernstlichen Störungen, mindestens starken Spannungsschwankungen Anlaß.

Zu solchen ersten Störungen wird es aber nur dann kommen können, wenn zwei der verschieden möglichen Schwingungen große Schwingungsamplitude und wenig verschiedene Schwingungsperiode haben, oder wenn die eine Schwingungsperiode sehr nahe ein ganzes Vielfaches einer anderen vorhandenen Schwingungsperiode ist.

Die Schwingungsamplituden, zumal die der aufgezwungenen Schwingungen, hängen von der Belastung ab, daher kommt es, daß manche Wechselstrommaschinen stets bei einer bestimmten Belastung außer Tritt fallen, während sie bei anderen Belastungen nur ein mehr oder minder starkes Pendeln erkennen lassen.

Besonders zeigen Synchronmotoren und synchron laufende Umwandler eine ausgesprochene Neigung zum Pendeln, weil bei ihnen die Massen fehlen, die sonst mit bewegt werden müssen, Kurbelstangen, Kolben, Schwungräder usw., und die Reibungen zwischen diesen Teilen, die sonst auf die Schwingungsantriebe dämpfend wirken.

8. Mittel zum Verhüten des Pendelns.

Die Erfahrung hat, wie bereits erwähnt, gezeigt, daß durch Riemen angetriebene Maschinen und solche, die von Turbinen angetrieben werden, selten starke Neigung zum Pendeln haben.

Bei direktem Antriebe veranlaßt der Ungleichförmigkeitsgrad stete Pendelungen. Durch passende Verteilung der Massen und besonders durch Anwendung genügend großer Schwungmassen kann man meist das Pendeln vermindern.¹⁾ Mit der Anwendung großer Schwungmassen aber darf man nicht zu weit gehen, weil sonst die Maschine nur träge dem Regulator folgt und die Möglichkeit einer raschen Regulierung der zugeführten mechanischen Energie oft sehr wünschenswert ist.

Am besten bewährt hat sich der Vorschlag von Hutin und Le Blanc, die äußersten Enden der Polflächen der Elektromagnete mit einer Kurzschlußwicklung zu versehen. In dieser Kurzschlußwicklung werden nur Ströme induziert, wenn Kraftlinien von der Wickelung geschnitten werden, d. h. wenn die Pole um die Stellung, die ihnen bei synchronem Laufe zukommt, hin und her schwanken.

Die Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft bringt zu diesem Zwecke in den Polflächen Nuten parallel der Drehachse an. In diese Nuten werden starke Kupferstäbe eingelegt und außen durch kräftige Kupferbügel untereinander verbunden. Die Eisenbleche, aus welchen

¹⁾ Große Schwungmassen haben allerdings den Nachteil, daß sie eine rasche Wirkung der Regulierung der Antriebsmaschine unmöglich machen.

die Pole hergestellt werden, erhalten diese Nuten von Anfang an. Die Stäbe werden jedoch erst eingelegt, wenn sich dies als nötig erweist, weil der Wirkungsgrad um einige Prozente verschlechtert wird. Fig. 468 zeigt die Art der Ausführung.

Es sind jedoch auch Fälle bekannt geworden, in welchen die elektrische Dämpfung geradezu das Pendeln vergrößert hat.¹⁾

Bei Drehstrommaschinen in Sternschaltung wird zumeist die

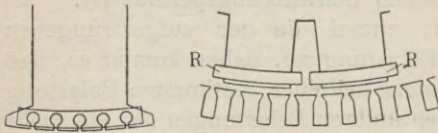


Fig. 468. Schutzvorrichtung der A. E.-G. gegen das Pendeln.

Neigung zum Pendeln größer, wenn man die Nullpunkte der Schaltung durch einen vierten Ausgleichsleiter verbindet.

Unterschiede in der Kurvenform der Wechselströme geben auch zu Ausgleichs-

strömen Anlaß; selten aber nehmen diese eine bedenkliche Größe an. Immerhin empfiehlt es sich davon abzusehen Maschinen, die Ströme von spitzer Kurvenform liefern, mit Maschinen parallel zu schalten, die Ströme von flacher Gestalt hervorbringen.²⁾

9. Phasenregler.

Bei Energieübertragung von einer Wechselstrommaschine auf eine andere, also bei dem Betriebe von Synchronmotoren, ist es wünschenswert mit möglichst geringer Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung arbeiten zu können, weil dann die Anker der Maschinen und die Leitung mit der kleinsten Stromstärke belastet werden und die Verluste durch Stromwärme usw. am kleinsten ausfallen. Jeder Wert der Stromstärke der Übertragung kann nun im allgemeinen mit zwei verschiedenen Spannungen erreicht werden; bei der kleineren Spannung ist selbstverständlich die Phasenverschiebung geringer als bei der größeren. Man wählt die Erregung des Feldes am Motor so, daß die Spannung einen wenig höheren Wert annimmt als diesen kleinsten, damit bei plötzlicher Zunahme der Belastung der Motor nicht stehen bleibt. Man erregt daher das Feld des Motors im allgemeinen für etwas höhere Spannung als die des Stromerzeugers, wenig höher als bis zu dem Werte, bei dem die geringste Stromstärke in der Leitung beobachtet wird.

Für Energieübertragungen mit mehrphasigem Wechselstrom würde dieses Mittel nicht ohne weiteres zum Ziele führen. Nach einem von

¹⁾ Vergl. Görges, ETZ 1902, S. 1053 und 1903, S. 378.

²⁾ Wer sich über das schwierige Problem des Pendelns näher unterrichten will, findet in der ETZ 1899, S. 134 (Kapp), 1899, S. 870 (Benischke), 1900, S. 188 (Görges), 1902, S. 59 (Föppl), 1903, S. 761, 857, 1024 (Rosenberg), S. 49, 561, 378, 1023 (Görges) weiteres Material.

Swinburne herrührenden und von Herrn v. Dolivo-Dobrowolski zuerst praktisch angewendeten Vorschlage schaltet man in diesem Falle eine leerlaufende Mehrphasenmaschine an der Stelle ein, wo sich vorzugsweise die Elektromotoren befinden. Das Feld dieser leerlaufenden Maschine, des sogenannten Phasenreglers, erregt man etwas stärker als der Betriebsspannung entspricht. Der Strom, den eine solche Maschine beim Leerlauf verbraucht, beträgt nur wenige Prozent des Betriebsstromes, aber er eilt der EMK voraus. Bei richtiger Wahl der höheren Spannung kann man auf diese Weise das Zurückbleiben des Stromes hinter der Spannung, wie es belastete Elektromotoren oder auch Transformatoren immer veranlassen, völlig ausgleichen, sodaß sich in der Leitung Strom und Spannung in gleicher Phase befinden.

Noch geeigneter zur völligen Phasenregelung ist die Anwendung des von Heyland (vergl. Kap. 25, 4.) angegebenen Kompensationsverfahrens.

35. Kapitel.

Verschiedene Schaltungsanordnungen für ein- und mehrphasigen Wechselstrom.

1. Ulbrichts System des einfachen Wechselstrombetriebes für Beleuchtungszwecke von Dreiphasenmaschinen aus.

Bei der Anlage von Elektrizitätswerken hat sich öfters das Bedürfnis herausgestellt für Beleuchtungszwecke gewöhnlichen einphasigen Wechselstrom, für den Betrieb von Elektromotoren dagegen Dreiphasenstrom zur Verfügung zu haben. Diese Aufgabe ist¹⁾ zuerst von Steinmetz und unabhängig von diesem von Ulbricht unter Mitwirkung der Firma Siemens & Halske in technisch und wirtschaftlich durchaus befriedigender Weise gelöst worden.

Anfänglich wurde in Erwägung gezogen, ob man nicht Wechselstrommaschinen und -Transformatoren für den weit überwiegenden Lichtbetrieb und Drehstrommaschinen und -Transformatoren für den Betrieb von Elektromotoren anwenden und beide parallel schalten sollte. Eine Reihe von Versuchen hat gezeigt, daß dies völlig angängig sei. Mit Rücksicht auf die Größe des Kraftbedarfes aber, und um eine größere Reserve zu haben, werden zumeist in solchen häufig vorkommenden Fällen alle Maschinen und Transformatoren für Drehstrom gewählt. Wir bemerken zunächst, daß jede Drehstrommaschine ohne weiteres als gewöhnliche Wechselstrommaschine gebraucht werden kann. Bei Sternschaltung (vergl. Kap. 13, 1., S. 222) bleiben die Verbindungen zweier Zweige genau wie vorher; der dritte Zweig wird abgetrennt und hinter die beiden anderen geschaltet. Ist die EMK für einen Zweig E , so ist sie für die beiden Zweige $E \cdot \sqrt{3}$ und für alle drei Zweige $2 E$. Der dritte Zweig erhöht also die EMK nur wenig; die Verluste durch Stromwärme und die Nachteile der Vergrößerung der Ankerreaktion durch den dritten Zweig machen sich dagegen sehr stark geltend. Es liegt daher der Gedanke nahe bei dem Gebrauche einer Drehstrommaschine zur Erzeugung von Wechselstrom den dritten Zweig einfach auszuschalten.

¹⁾ Ende des Jahres 1892.

Bei dem Elektrizitätswerke auf den Dresdener Bahnhöfen ist die gesamte Beleuchtung in eine Phase verlegt (sie liegt also zwischen den Enden zweier Wickelungen), und in dieser Phase wird die Spannung während des Betriebes genau konstant erhalten. Für Motorbetrieb werden alle drei Phasen verwendet, und für diesen spielen geringe Schwankungen in der Spannung keine wesentliche Rolle.

Selbstverständlich entstehen dann stärker und minder belastete Phasen, und dadurch wird das Drehfeld etwas verzerrt; da aber der Lichtbetrieb mit dem Motorbetriebe nur während eines sehr geringen Teiles der gesamten Betriebszeit zusammenfällt, so kann ein weniger günstiger Wirkungsgrad der Motoren in dieser kurzdauernden Periode die Wirtschaftlichkeit des gesamten Betriebes nicht sonderlich ungünstig beeinflussen. Die Versuche haben aber ergeben, daß die den Drehstrom erzeugenden Maschinen nur um wenig breiter gebaut werden müssen, und daß ein ungünstiger Einfluß auf die Anzugskraft und Leistung der Elektromotoren kaum wahrnehmbar ist.

Es zeigte sich ferner, daß, wenn man eine Drehstrommaschine für Motorbetrieb einer oder mehreren Drehstrommaschinen parallel

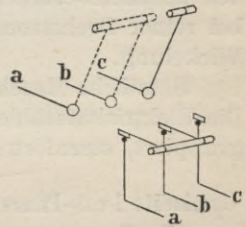


Fig. 469. Die Ausschalter des Dresdner Bahnhofs-Elektrizitätswerkes.

Gemischte 1-u.3-Phasen-Schaltung

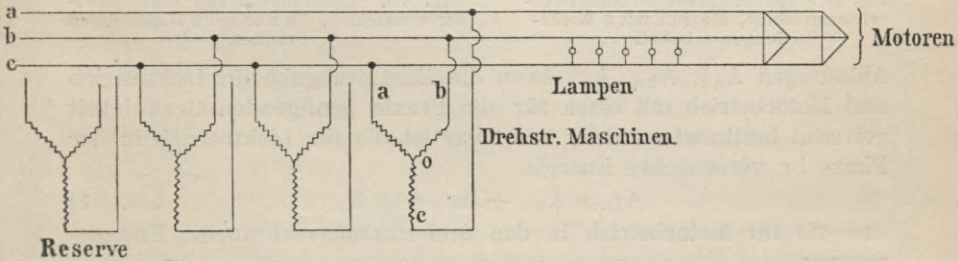


Fig. 470. Schaltung des Elektrizitätswerkes der Dresdener Bahnhöfe.

schaltete, deren dritte Wickelung ausgeschaltet war, die in den drei Leitungen vorkommende Drehstromarbeit von der Drehstrommaschine allein geleistet wurde, sofern sie nur groß genug war und ihrer Dampfmaschine die ihrer Leistung entsprechende Dampfmenge zugeführt wurde. Der Lichtbetrieb wurde dann einzig von der als Wechselstrommaschine mit zwei Wickelungen und einer Phase tätigen Maschine allein geleistet; das Einrücken und Ausschalten von Elektromotoren beeinträchtigte deren Spannung durchaus nicht mehr in störender Weise. Die Hauptausschalter der Maschinen sind daher durchgeschnitten worden (vergl. Fig. 469), sodaß jede der Drehstrom-

maschinen mit zwei oder mit drei Wickelungen an die Leitungen gelegt werden und mit einer oder mit drei Phasen arbeiten kann.

Die Schaltung gestaltet sich dann so, wie dies Fig. 470 zeigt, wobei angedeutet ist, daß die dritte im allgemeinen minder belastete Leitung dünner gewählt werden kann als die beiden anderen.

Die folgenden beiden Abbildungen Fig. 471 und Fig. 472 zeigen den zeitlichen Verlauf der Spannungen in den drei Zweigen, einmal bei reiner Drehstromschaltung und dann bei Ausschaltung der einen Wickelung.

Sämtliche Maschinen und Transformatoren haben Sternschaltung. Die Elektrizitätszähler, einfache Wechselstromzähler, sind, zu je drei gruppiert, sternförmig an den Nullpunkt geschaltet. Aus den drei

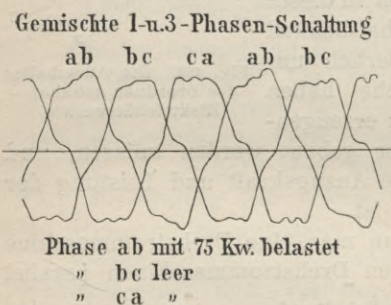


Fig. 471. Spannungskurven einer Drehstrommaschine, die nur mit 2 Wickelungen arbeitet.

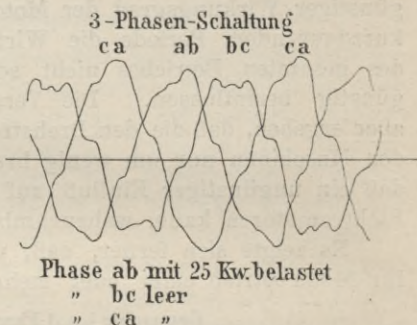


Fig. 472. Spannungskurven einer Drehstrommaschine, die nur mit 2 Wickelungen arbeitet.

Ablesungen A_{a0} , A_{b0} , A_{c0} kann die Energieabgabe für Lichtbetrieb und Motorbetrieb mit einer für die Praxis genügenden Genauigkeit getrennt bestimmt werden, und zwar ist die für Lichtbetrieb in der Phase bc verbrauchte Energie

$$A_L = A_{a0} + A_{b0} - 2 A_{c0} \dots \dots \dots 1)$$

und die für Motorbetrieb in den drei Phasen verbrauchte Energiemenge:

$$A_M = 3 A_{c0} \dots \dots \dots 2)$$

Die Dresdener Anlage ist nunmehr bereits längere Jahre im Betrieb und hat sich in jeder Beziehung, sowohl was die Ruhe des Lichtes anbetrifft, als hinsichtlich der Leistungen der Drehstrommotoren gut bewährt.

2. Das Mono- und Polyzyklische System von Ch. Pr. Steinmetz.

Auch der berühmte amerikanische Elektriker Steinmetz hat auf eine Reihe verwandter Schaltungen amerikanische Patente genommen, bei denen auch Mehrphasenströme für Motorbetrieb erzeugt werden,

und für Beleuchtungszwecke einfacher Wechselstrom entnommen wird. Während Uibrich Drehstrommaschinen mit drei gleichen Wickelungs-
zweigen bei seinem System verwendet, benutzt Steinmetz Wechsel-
strommaschinen mit einer Hilfswicklung, die einen in der Phase
verschobenen Strom für den Motorbetrieb liefern. Auf dem Anker
einer Wechselstrommaschine ist eine gegen
die Hauptspule versetzte weitere Wicke-
lung angeordnet; das eine Ende derselben
ist an die Mitte der Hauptwicklung an-
geschlossen, das andere Ende führt zu
dem dritten Leitungsdrahte. Diese dritte
Windung hat jedoch nur ein Viertel der
Windungen und liefert deshalb eine wesent-
lich niedrigere EMK.

Die Fig. 473 zeigt schematisch die
Anordnung einer solchen Mehrphasen-
maschine nach Steinmetz. In der Mitte

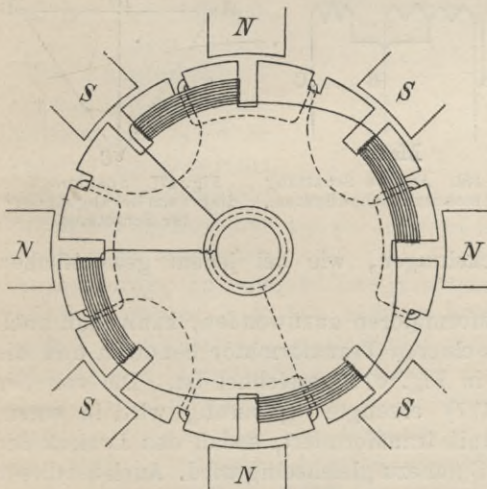


Fig. 473. Wechselstrommaschine für das mono-
zyklische System von Steinmetz.

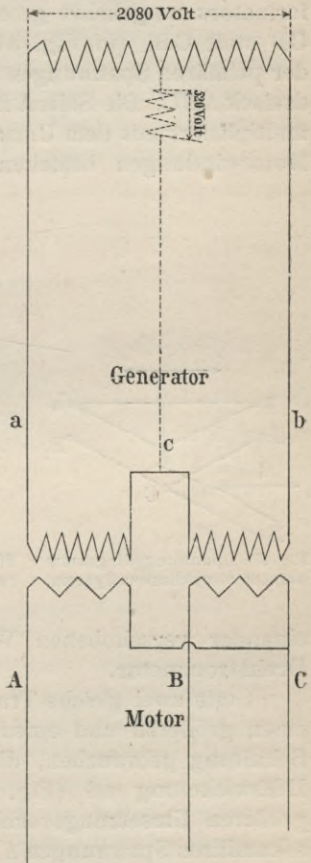


Fig. 474. Schaltung der Trans-
formatoren bei dem mono-
zyklischen System.

zwischen den Nuten des Ankers, die die Hauptwicklung tragen, be-
findet sich ein zweites System kleinerer Nuten, in die die Neben-
wicklung eingelagert ist. Die drei konzentrischen Kreise in der
Mitte deuten die drei Schleifringe an, an die die Enden der Haupt-
wicklung (ausgezogen) und das eine Ende der Nebenvicklung
(gestichelt) geführt sind. Der Strom, der in der Hilfswicklung erzeugt

wird, kehrt somit über die beiden Hälften der Hauptstromwicklunglung zurück und hat daher, außer der eigenen, auch die Selbstinduktion der Hauptspulen zu überwinden.

Fig. 474 zeigt die Verbindung der Stromerzeuger mit den Motoren durch die Transformatoren. Da die Sekundärspule des zweiten Transformators umgekehrt geschaltet wird, wird die sekundäre Spannung CB statt CB_1 (in Fig. 475). Dadurch wird aus dem Dreieck abc der primären Spannungen im sekundären Stromkreise das Spannungsdreieck ABC . Die Seite AB ist gleich dem doppelten der Hilfsspannung multipliziert mit dem Umsetzungsverhältnis der Transformatoren. Die Motorwindungen bestehen aus drei um 120° in der Phase gegen-

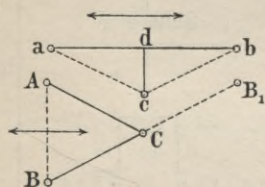


Fig. 475. Spannungsdreieck beim monozyklischen System.

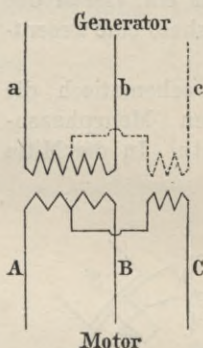


Fig. 476. Andere Schaltung beim monozyklischen System.

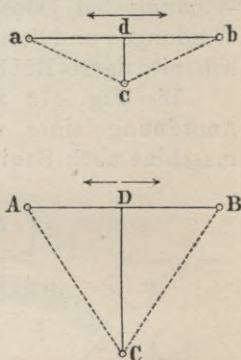


Fig. 477. Spannungsdreieck bei abgeänderter Schaltung.

einander verschobenen Wicklungen, wie bei jedem gewöhnlichen Drehstrommotor.

Statt zwei gleiche Transformatoren anzuwenden, kann man auch einen größeren und einen kleineren Transformator benutzen und die Schaltung gebrauchen, die in Fig. 476 gezeichnet ist. Die von der Hilfswicklung cd (Fig. 477) erzeugte Spannung wird in einem größeren Umsetzungsverhältnis transformiert, sodaß das Dreieck der sekundären Spannungen ABC nahezu gleichseitig wird. Auch bei dieser Anordnung können an die Klemmen ABC gewöhnliche Drehstrommotoren angeschlossen werden.

Die Ströme sind nahezu phasengleich und besitzen die in Fig. 475 und 477 durch die Doppelpfeile angedeuteten Richtungen, wenn die Phasenverschiebung im Motor unberücksichtigt bleibt.

Ein Unterschied zwischen dem Ulbrichtschen und dem Steinmetzsch System dürfte, abgesehen von den eigentümlichen Schaltungen, darin zu erkennen sein, daß die Maschinen und Motoren bei Steinmetz in der Hauptsache nur beim Anlaufen und bei Belastungs-

änderungen als Mehrphasenmaschinen, dann aber in der Hauptsache als Einphasenmaschinen und Einphasenmotoren weiter laufen, und daß zwar die Spannungen, nicht aber die Ströme erhebliche Phasenverschiebungen besitzen.

3. Das polyzyklische System von Steinmetz.

Dem monozyklischen System für Wechselstromverteilung hat Steinmetz (General Electric Co.) das polyzyklische folgen lassen; hauptsächlich soll es das elektrische Gleichgewicht aufrecht erhalten, wenn an denselben Stromkreis Lampen und Motoren angeschlossen sind. Das Prinzip erhellt aus der Fig. 478. Die Feldmagnete F des Stromerzeugers werden von dem Erreger E gespeist. Die Armatur ist die einer Dreiphasenmaschine, welche in der Zeichnung in der Dreieckschaltung verbunden ist.

Die Lichtleitung L steht durch einen Transformator T mit den Leitern a c, die Motoren mit a b c in Verbindung. Das Neue an dem System besteht darin, daß die Konsumstellen für einfachen

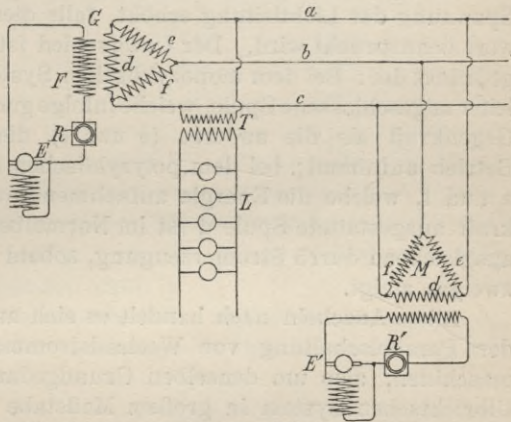


Fig. 478. Schaltung beim polyzyklischen System von Steinmetz.

Wechselstrom an einen Zweig angeschlossen werden, und daß zwischen diesem und dem anderen Stromkreise durch eine Motorspule Energieübertragung stattfindet. Es sei beispielsweise die Lampenbelastung in einer Anlage ein Drittel der Motorbelastung, dann wird die Selbstinduktion der mit d bezeichneten Spulen des Generators und des Motors oder der Widerstand und die Selbstinduktion der Hauptleitung so sein, daß bei normaler Belastung in ihnen kein Strom von a c fließt. Dieser Zweig wird vielmehr die Lampen speisen, während die Motoren ihre Energie aus den beiden anderen Zweigen b c und a b erhalten. Es wird also, praktisch genommen, Gleichgewicht zwischen der elektromotorischen Gegenkraft, welche in der Motorspule d erzeugt wird, und der »aufgedrückten EMK« in dem Lichtstromkreis bestehen.

Wenn das Verhältnis aber gestört wird, z. B. durch Veränderung der Spannung infolge zunehmender Lampenbelastung, so wird das Gleichgewicht durch den Strom der Motorspule d aufrecht erhalten,

welcher je nach den Verhältnissen die Lampen oder die Motoren unterstützt. Die Spulen e und f haben weniger Windungen als die entsprechenden des Stromerzeugers, sodaß sie im normalen Betrieb Kraftströme erhalten.

Während die Regulierung bei dem monozyklischen System so gedacht ist, daß der Lichtstromkreis zugleich die Motoren, welche bereits mit normaler Geschwindigkeit laufen, speist, und die Motorleitung bei Schwankungen, wie z. B. beim Anlauf, in Anspruch genommen wird, so soll umgekehrt bei dem polyzyklischen System eine Regulierung dadurch hervorgebracht werden, daß die Motorleitung, welche stets die Energie der normal laufenden Motoren liefert, selbsttätig die Spannung der Lichtleitung erhöht, falls diese stärker als der Normalwert beansprucht wird. Der Unterschied ist mit anderen Worten ausgedrückt der: Bei dem monozyklischen System ist es die an die Außenleiter angeschlossene Spule, welche infolge geringerer elektromotorischer Gegenkraft als die anderen (e und f) die Energie beim normalen Betrieb aufnimmt; bei dem polyzyklischen System sind es die Spulen e und f, welche die Energie aufnehmen, und die mit höherer Gegenkraft ausgestattete Spule d ist im Normalbetrieb stromlos, wirkt aber ausgleichend durch Stromerzeugung, sobald die Belastung des Lampenzweiges steigt.

Allem Anschein nach handelt es sich auch hier um den Vorschlag der Parallelschaltung von Wechselstrommaschinen mit Dreiphasenmaschinen, also um denselben Grundgedanken, der bereits in dem Ulbrichtschen System in großem Maßstabe auf dem Dresdener Bahnhofe zur praktischen Ausführung gekommen ist, nur daß die Unterdrückung der Wirkung der dritten Wickelung der Dreiphasenmaschine bei Ulbricht auf mechanischem Wege ausgeführt, bei Steinmetz auf elektrischem Wege erreicht wird.¹⁾

4. C. F. Scotts Umwandlung eines Zweiphasen- in ein Dreiphasensystem und umgekehrt.

Eine Zweiphasenmaschine G liefert ihre beiden in der Phase gegeneinander verschobenen Ströme an zwei Transformatoren T_1 und T_2 . (Vergl. Fig. 479.) Das eine Ende der Sekundärspule des Transformators T_1 ist in der durch die Fig. 479 angedeuteten Weise mit der Mitte der Sekundärwicklung von T_2 verbunden. Es entstehen auf diese Weise drei Klemmen A, B, C, an die ohne weiteres das Dreileitersystem angeschlossen werden kann.

Da die Ströme, welche die primären Wickelungen von T_1 und T_2 durchfließen, einen Phasenunterschied von 90° erhalten, so besitzen

¹⁾ Solchen, die sich für diese Schaltungen interessieren, ist auch das Studium der amerikanischen Patentschrift No. 4129/32 von Shallenberger zu empfehlen.

gegeneinander verschoben sind. Jeden einzelnen dieser Wechselströme kann man nun zur Speisung von Beleuchtungskörpern oder beide zusammen zum Betrieb von Zweiphasenmotoren verwenden.

Fig. 479 stellt ein solches Verteilungssystem unter Anwendung der Scottschen Schaltungen dar. G bedeutet die Maschine, die den Zweiphasenstrom erzeugt, T_1 T_2 sind die nach Scott geschalteten Transformatorengruppen, Z ist ein Zweiphasenmotor, D ein Drehstrommotor und L_1 und L_2 sind zwei mit einfachem Wechselstrom betriebene Lampengruppen.

5. Das polyzyklische Stromverteilungssystem von Arnold-Bragstadt-la Cour.¹⁾

Der Amerikaner Bedell²⁾ hatte zuerst darauf hingewiesen, daß man in irgend zwei Punkte einer elektrischen Energieübertragungsanlage, die gleiches Potential haben, z. B. in die beiden neutralen

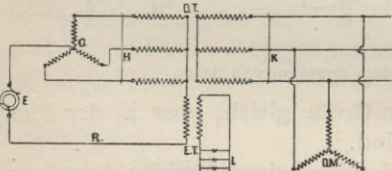


Fig. 482. Polyzyklisches System nach Bedell. leiten könne, ohne daß dadurch das Dreiphasensystem irgendwie beeinflußt wird.

In Fig. 482 ist beispielsweise eine derartige Einrichtung schematisch dargestellt. G ist ein Drehstromerzeuger in Sternschaltung, H sind die drei Leiter des Drehstromsystemes, D T ist ein Drehstromtransformator mit Sternschaltung zur Speisung des für Motorbetrieb bestimmten Drehstromnetzes K, z. B. ist DM einer der angeschlossenen Drehstrommotoren. E bedeutet eine einphasige Wechselstrommaschine, die ihren Strom einerseits in den Nullpunkt der Sternschaltung des Dreiphasengenerators, andererseits durch die Primärwicklung eines Einphasentransformators ET in den Nullpunkt der Sternschaltung des Drehstromtransformators DT sendet.

Als Rückleitung des einphasigen Wechselstromes dient somit die Drehstromleitung, während andererseits die Hinleitung R des einphasigen Wechselstromes als vierter, sogenannter Ausgleichsleiter (vergl. Kap. 21, 2, S. 373) des Drehstromsystemes dient.

Denkt man sich z. B., daß der Drehstrom die für Motorbetrieb bequemere Periodenzahl $\sim = 25$ hat, der einphasige Wechselstrom dagegen die für Lichtbetrieb zweckmäßigere Wechselzahl 75, so hat

¹⁾ ETZ 1902, Heft 26, S. 569.

²⁾ Amerikanische Patente No. 645907.

man einen einfachen Fall eines sogenannten polyzyklischen Systems vor sich.

Bei dieser Bedellschen Anordnung verlaufen die übereinander gelagerten (superponierten) Ströme aber nur in den primären Leitungen.

Wäre E eine Gleichstrommaschine, so würde die Selbstinduktion der Wickelungen der Drehstrommaschine und der primären Wickelungen des Drehstromtransformators nicht zur Geltung kommen, es würde vielmehr nur der geringfügige Ohmsche Widerstand W dieser Wickelungen zu überwinden sein.

Für die gemeinsame Erregung einer Drehstrommaschine und eines fern gelegenen Drehstromsynchronmotors durch eine Gleichstrommaschine ist daher die Bedellsche Schaltung recht wohl verwendbar.

Ist E aber eine Wechselstrommaschine, so kommt der scheinbare Widerstand, die Impedanz $\sqrt{w^2 + \omega^2 \cdot L_1^2 + \omega^2 L_2^2}$ zur Wirkung, und diese wird einen sehr bedeutenden induktiven Spannungsabfall in der Wechselstromleitung zur Folge haben. Für Superponierung von Wechselstrom auf ein Drehstromsystem, der Fall, der gerade für die Praxis Bedeutung haben würde, ist daher das Bedellsche System minder geeignet.

Den induktiven Spannungsabfall in den Wickelungen der Drehstrommaschine und des Drehstromtransformators kann man aber nach einem von Arnold-Bragstadt-La Cour angegebenen Verfahren¹⁾ vermeiden, indem man die Wickelungen durch eine bifilare Anordnung in bezug auf den dem Drehstrom superponierten Wechselstrom induktionsfrei macht.

Da der superponierte Wechselstrom alle drei Phasen des Drehstromsystems in gleichem Sinne durchströmt (vergl. die Pfeile in Fig. 483), so braucht man nur je zwei Phasen so zu legen, daß die eine Hälfte dieser Phasen, vom neutralen Punkte aus gerechnet, in einem Sinne und die andere Hälfte im entgegengesetzten Sinne verläuft; dann ist die magnetisierende Wirkung des superponierten Wechselstromes für eine solche Wickelungsseite gleich null und daher die Selbstinduktion vernachlässigbar.

Fig. 483 stellt z. B. die von Drehstrom und superponiertem Wechselstrom gleichzeitig durchflossene Primärwicklung eines Drehstromtransformators dar, dessen (nicht gezeichneter) Sekundärwicke-

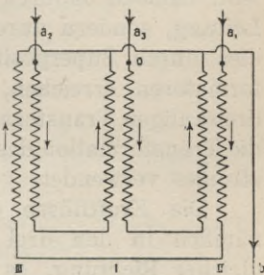


Fig. 483. Induktionsfreie Schaltung der Primärspulen eines Transformators.

¹⁾ Geschützt durch D. R.-P. No. 131500.

lung transformierter Drehstrom entnommen werden kann. Die Klemmen a_1, a_2, a_3 dienen zur Einführung der drei in der Phase verschobenen Ströme a_1, a_2, a_3 des Drehstromsystems und gleichzeitig zur Aufnahme des übergelagerten Wechselstromes. Durch b wird der übergelagerte Wechselstrom abgeführt. Die beigezeichneten Pfeile beziehen sich auf die momentane Richtung des superponierten Wechselstromes.

Auf Säule I wickelt man je die Hälfte der Phasen a_3 und a_2 , auf Säule II je die Hälften der Phasen a_3 und a_1 und auf Säule III je die Hälften der Phasen a_1 und a_2 .

Die induktiven Wirkungen des Hauptstromes addieren sich, während die des superponierten Stromes, weil sie in parallelen Windungen entgegengesetzt verlaufen, sich gegenseitig aufheben. 0 ist

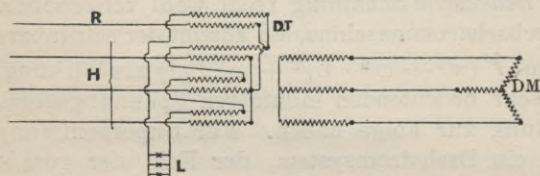


Fig. 484. Viersäuliger Transformator für Drehstrom und übergelagerten Wechselstrom.

der neutrale Punkt, in dem die drei Phasen a_1, a_2, a_3 in Sternschaltung verkettet sind.

Das beispielsweise an einem Transformator gezeigte Verfahren läßt sich in ähnlicher

Weise auch bei Drehstrommaschinen und -Motoren verwenden.¹⁾

Dieselben Erfinder haben aber ferner gezeigt, daß der induktive Spannungsabfall, der den Haupteinwand gegen das Bedellsche polyzyklische System bildet, sich noch auf eine andere Weise vermeiden läßt, nämlich dadurch, daß die verschiedenartigen Ströme nicht durch Leitung, sondern durch Induktion eingeführt werden.²⁾ Man kann dies durch Superposition von magnetischen Kraftflüssen in Transformatoren erreichen, indem man einen viersäuligen anstatt eines dreisäuligen Transformators mit gemeinsamen Jochen gleichzeitig für die Transformation des Hauptstromes und des superponierten Wechselstromes verwendet.

Die Kraftflüsse des superponierten Wechselstromes verlaufen nämlich in den drei Haupteisensäulen des Transformators alle in gleicher Richtung, es muß also eine vierte Säule da sein, die als magnetische Rückleitung für diese Kraftlinien dient.

Auf diese vierte Säule bringt man eine primäre und eine sekundäre Wicklung, in welchen nur die superponierten Ströme fließen.

Die Fig. 484 zeigt die Anordnung eines solchen Systems. Durch die drei Hauptleitungen H werden sowohl die drei Dreiphasenströme,

¹⁾ Vergl. ETZ 1902, Heft 26, S. 570.

²⁾ Geschützt durch D. R.-P. No. 127 792.

als auch der superponierte Wechselstrom zugeführt. R dient als Rückleitung des übergelagerten Wechselstromes. DT ist der viersäulige Transformator. Es dient DT zur gleichzeitigen Transformierung und Abgabe der beiden Stromarten. Der transformierte Drehstrom dient zur Speisung eines Drehstrommotors DM, der transformierte Einphasenstrom zur Speisung der Lichtleitung L.

Man kann aber auch in einem polyzyklischen System gleichzeitig fließenden Mehrphasenstrom und superponierten Einphasenstrom von verschiedener Periodenzahl transformieren, ohne sie zu trennen. — Man benutzt wieder einen Transformator, dessen vier Säulen durch

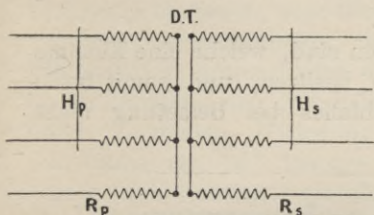


Fig. 485. Andere Anordnung eines viersäuligen Transformators für Drehstrom und übergelagerten Wechselstrom.

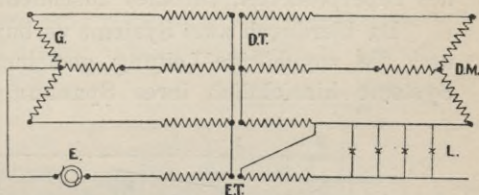


Fig. 486. Polyzyklisches System, unabhängig im primären, abhängig im sekundären Teil.

zwei Joche magnetisch geschlossen sind, und führt die vierte Leitung R (Rückleitung des superponierten Stromes) sowohl primär R_p als sekundär R_s so viele Male um die vierte Säule, daß das Transformationsverhältnis das gewünschte wird (vergl. Fig. 485). H_p ist die primäre, H_s die sekundäre Drehstromleitung; R_p die primäre, R_s die sekundäre Rückleitung des übergelagerten Wechselstromes.

Arnold - Bragstadt - la Cour denken sich auch beide Ströme in einem Stromerzeuger in einer Dreiphasenwicklung gleichzeitig erzeugt, indem sie zwei Magneträder verwenden, wovon das eine die dreifache Polzahl des anderen besitzt (entsprechend $\sim = 25$ für den Drehstrom und $\sim = 75$ für den Wechselstrom).

Durch passende Superposition der beiden EMKräfte kann man in dem Stromerzeuger sogar die magnetische Maximalinduktion verringern und dadurch die Hysterisisverluste verkleinern und die Gesamtleistung der Maschine vergrößern.

Nach einem den Erfindern ebenfalls patentierten Verfahren ¹⁾ kann

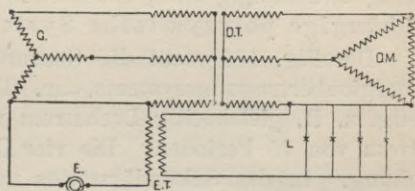


Fig. 487. Polyzyklisches System, abhängig im primären und im sekundären Teile.

¹⁾ D. R.-P. No. 128 406.

man, wie dies in Fig. 486 beispielsweise für das sekundäre, in Fig. 487 für das primäre und sekundäre System gezeigt ist, die superponierten Ströme in gemeinsamer Leitung bis zu den Stromverbrauchsstellen führen und sie dort ohne Anwendung besonderer Apparate trennen.

Man verlegt zu dem Zwecke den Einführungspunkt des superponierten Wechselstromes nicht an den neutralen Punkt des Dreiphasensystems, sondern an eine innere Klemme des Hauptsystems. (Fig. 487.) Man kann dann die zur Aufnahme des übergelagerten Stromes bestimmten Apparate einerseits zwischen die Leitung legen, die von dieser inneren Klemme ausgeht, andererseits an die Rückleitung des superponierten Stromes anschließen.

Da hierdurch zwei Systeme verbunden sind, welche eine Klemme und die zugehörige Leitung gemeinsam besitzen, und somit beide Systeme hinsichtlich ihres Spannungsabfalles bei Belastung nicht

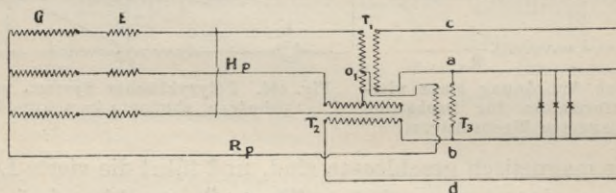


Fig. 488. Gesamtanordnung eines polyzyklischen Systems in ABC-Schaltung.

völlig unabhängig sind, bezeichnet man derartige Anordnungen als abhängige polyzyklische Systeme.

Die Fig. 488 stellt die Gesamtanordnung eines polyzyklischen Energieübertragungssystems dar. Der Doppelgenerator G und E erzeugt z. B. gleichzeitig Drehstrom von 25 Perioden und Einphasenstrom von 75 Perioden. Die vier Drähte H_p und R_p bilden die Fernleitung. In der Sekundärstation wird der Drehstrom mittels zweier Einphasentransformatoren T_1 und T_2 nach der Scottschen Schaltung (vergl. S. 579) in Zweiphasenstrom umgewandelt.

Der superponierte Wechselstrom erzeugt keinen Kraftlinienfluß in den beiden Transformatoren und kann somit in Punkt O_1 der Primärwicklung des Transformators T_1 entnommen werden. Im Transformator T_3 wird der superponierte Einphasenstrom transformiert, und da die Sekundärwicklung zwischen die zwei Leitungen des Zweiphasensystems a und b geschaltet ist, können die mit Einphasenstrom gespeisten Lampen direkt zwischen a und b geschaltet werden.

Bezüglich weiterer Einzelheiten, zumal die Spannungsverhältnisse zwischen den Leitungen, Kupferersparnis u. s. f. betreffend, verweisen wir auf die Originalabhandlung, bezüglich der Wickelungen und Schaltungen auf die angezogenen Patentschriften.

Die Zahl der Fälle, in welchen die Ersparnis nur einer Leitung für den übergelagerten Wechselstrom gegen die erhebliche Komplikation der geistreich ausgedachten einzelnen Schaltungen und der ganzen Anlage einen wirklichen Vorteil darbietet, dürfte nicht sehr zahlreich sein.

6. Das Verteilungssystem von Ferraris und Arnò.¹⁾

Der wichtigste Teil dieses Verteilungssystems ist ein von den Erfindern Verschiebungstransformator genannter Apparat.

Diese Vorrichtung beruht auf der Beobachtung der bisher unbekannt gebliebenen, aber theoretisch leicht erklärbaren Tatsache, daß ein Zweiphasenstrommotor, dessen eine Wickelung von gewöhnlichem Wechselstrom gespeist wird, und dessen Anker sich in Umlauf befindet, in der zweiten, um eine halbe Polbreite versetzten Wickelung einen sehr nahe um 90° in der Phase gegen den ersten verschobenen Wechselstrom liefert.

Wenn man diese zweite Wickelung BB' des Zweiphasenmotors (vergl. Fig. 489) aus einer Anzahl von Windungen herstellt, die zur Zahl der Windungen AA' , die vom primären Wechselstrom durchflossen werden, in einem gewissen Verhältnis steht, so ist auch die an den Klemmen der zweiten Wickelung BB' entstehende EMK der primären gleich; wenn man dagegen die sekundäre Wickelung aus mehr oder weniger Windungen bestehen läßt, so kann man eine beliebig höhere oder beliebig niedrigere EMK erzeugen.

Wenn die zweite oder sekundäre Wickelung BB' mit der primären AA' nicht einen Winkel von 90° , sondern einen kleineren oder größeren Winkel einschließt, so beträgt auch der Phasenunterschied des in BB' induzierten, sekundären Stromes gegen den in AA' fließenden primären Strom nicht mehr nahezu 90° , sondern der Phasenunterschied ist ungefähr im Verhältnisse der Winkel geringer oder größer.

Der Gebrauch des Verschiebungstransformators ist also einfach der, daß man den zu diesem Zwecke verwendeten Zweiphasenstrommotor als asynchronen Wechselstrommotor unbelastet anlaufen läßt, wobei die um eine Viertelperiode versetzte sekundäre Wickelung BB'

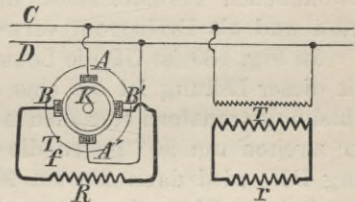


Fig. 489. Gebrauch eines Verschiebungstransformators und eines gewöhnlichen Transformators.

¹⁾ Weitere Einzelheiten über diese beachtliche Erfindung enthält die Broschüre: Galileo Ferraris und Riccardo Arnò, Ein neues System zur elektrischen Verteilung der Energie mittels Wechselströmen. Deutsch von Heim. Weimar, Steinert, 1896.

zunächst offen bleibt. Nachdem der Anker eine angemessene Umlaufzahl erreicht hat, schließt man den Stromkreis der sekundären Wickelung und verwendet den dort erzeugten, in der Phase gegen den ersten verschobenen Wechselstrom nach Bedarf.

Obgleich die Erfinder dies nicht besonders erwähnt haben, bedarf es kaum des besonderen Hinweises, daß man auch mit einem Dreiphasenmotor in gleicher Weise verfahren könnte. Man kann eine der drei Wickelungen, die in diesem Falle nicht verkettet sein dürften, mit gewöhnlichem Wechselstrom speisen und läßt den Motor als asynchronen Einphasenmotor anlaufen. Die in den beiden anderen Wickelungen induzierten EMKräfte würden eine Phasenverschiebung von 60° , beziehentlich 120° gegeneinander zeigen und könnten weiterhin mit dem ersten Strom zusammen oder mit einem durch einen gewöhnlichen Transformator umgesetzten Teil dieses Stromes verkettet und als Drehstrom verwendet werden.

In Fig. 489 ist CD die Leitung, die einfachen Wechselstrom führt. Mit dieser Leitung ist die eine (primäre) Wickelung AA' des als Verschiebungstransformator dienenden Zweiphasenmotors verbunden. In der zweiten um 90° gegen die erste versetzten (sekundären) Wickelung BB' wird dann die um 90° in der Phase gegen die primäre verschobene Wechselspannung induziert, und diese erzeugt in dem Widerstande R einen Wechselstrom.

Nehmen wir an, der ursprüngliche, in CD fließende Wechselstrom habe eine Spannung von 1000 Volt, und der in der sekundären Wicke-

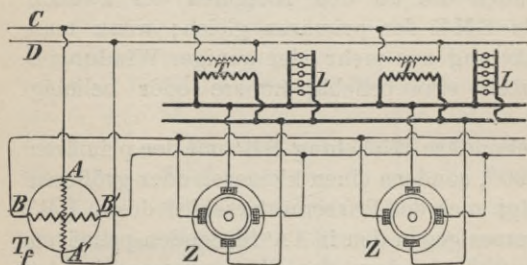


Fig. 490. Zweiphasenverteilung von einer einfachen Wechselstrommaschine nach Ferraris und Arnö.

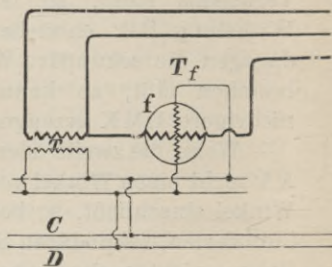


Fig. 491. Zweiphasensystem mit nur drei Leitern.

lung BB' des Verschiebungstransformators induzierte Wechselstrom habe eine Spannung von 100 Volt. Legt man nunmehr an CD noch einen gewöhnlichen Transformator T mit dem Umsetzungsverhältnis $10 : 1$, so hat man nunmehr in den beiden in R und in r induzierten Strömen zwei um 90° in der Phase verschobene Wechselströme vor sich, die zum Betriebe eines Zweiphasensystems oder zum Anlauf oder Betrieb von Motoren verwendet werden, oder auch nach dem

Scottschen Verfahren (vergl. S. 578) in ein Dreiphasensystem verwandelt werden können.

Fig. 490 erläutert, wie etwa ein solches durch einen Verschiebungstransformator T_f und gewöhnliche Transformatoren $T, T \dots$ gespeistes Zweiphasensystem aussehen würde.

$Z, Z \dots$ sind hierbei Zweiphasenmotoren, $L L \dots$ Lampen.

Die Fig. 491 zeigt ferner, wie man dadurch, daß man eine Klemme der sekundären Wickelung des Verschiebungstransformators T_f mit einer Klemme der sekundären Spule eines gewöhnlichen Transformators T verbindet, auch ein Zweiphasensystem mit nur drei Leitungen (vgl. S. 361) herstellen kann.

Durch die nebenstehende Abbildung (Fig. 492) endlich wird erläutert, wie durch eine unter passendem Winkel schräg gestellte sekundäre Wickelung eines Verschiebungstransformators T_f und durch einen gewöhnlichen Transformator T ein Drehstromnetz gespeist werden kann. CD ist auch hier, wie vorher, die Leitung, die gewöhnlichen Wechselstrom führt.

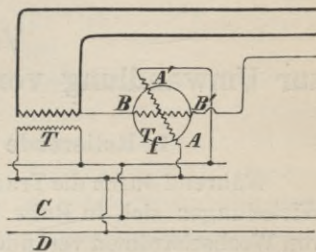


Fig. 492. Drehstrom, erzeugt durch einen Verschiebungstransformator und einen gewöhnlichen Transformator.

36. Kapitel.

Vorrichtungen zur Umwandlung von Wechselstrom in Gleichstrom.

1. Rotierende Umformer oder Konverter.

Während durch die Transformatoren, deren primäre und sekundäre Wickelungen sich in Ruhe befinden, nur Spannung und Stromstärke von Wechselströmen verändert wird, sind die Umwandler Vorrichtungen mit rotierenden Wickelungen, durch die Wechselstrom in Gleichstrom und umgekehrt, also eine Stromgattung in eine andere verwandelt werden kann.

Diese Apparate finden von Jahr zu Jahr in vermehrtem Umfange Anwendung in der Praxis, da die Bequemlichkeit und Sicherheit, mit der sich Wechselströme und Mehrphasenströme von hoher Spannung erzeugen lassen, diese Stromart für Energieübertragungen auf weite Entfernungen ganz besonders, ja man kann fast sagen einzig geeignet erscheinen lassen. Außerdem bietet der Wechselstrom den großen Vorteil dar, daß er durch ruhende Apparate, die Transformatoren, an den Verwendungsstellen ohne erhebliche Verluste auf jede beliebige Spannung gebracht werden kann. — Immerhin gibt es eine Anzahl von Anwendungen elektrischer Energie, wir erinnern an die elektrischen Bahnen für kürzere Strecken, den Gebrauch von Elektromotoren für manche Arten von Hebezeugen, an die Bogenlichtbeleuchtung, wo man zur Zeit noch immer mit Vorliebe Gleichstrom verwendet; für alle elektrochemischen Vorgänge, zumal für das Laden der Akkumulatoren, ist mit ganz verschwindenden Ausnahmen der Gleichstrom geradezu unersetzlich.

Früher geschah die Umwandlung von Wechselstrom in Gleichstrom ausschließlich dadurch, daß man einen Wechselstrommotor mit einer Gleichstrommaschine auf eine Achse montierte, oder durch eine geeignete Kuppelung die Wellen miteinander verband. — Dieser Art der Anordnung, man nennt sie Motorgeneratoren, hat den großen Vorzug, daß man hinsichtlich des Spannungsverhältnisses zwischen Wechselstrom und Gleichstrom völlig unbeschränkt ist. Man kann also z. B. Wechselstrom oder Drehstrom von 6000 Volt oder mehr erzeugen und durch verhältnismäßig dünne und wenig kostspielige Leitungen auf weite Entfernungen fortführen, und dort unmittelbar

einem für diese Spannung bestimmten synchronen oder asynchronen Motor zuführen.¹⁾

Dieser Motor betreibt alsdann eine oder auch mehrere z. B. zwei rechts und links vom Wechselstrommotor angeordnete Gleichstrommaschinen für etwa 500 Volt, durch die alsdann das Netz einer Straßenbahn oder ein Stromverteilungsnetz für Licht- und Kraftzwecke im Zwei- oder Mehrleitersystem gespeist wird.

Für die Versorgung großer Städte mit elektrischer Energie von fern gelegenen Wasserkräften oder Kohlenwerken aus werden solche Anordnungen häufig erhebliche Vorzüge darbieten, weil sie die Aufstellung von Dampfmaschinen im Innern der Städte entbehrlich machen. Da aber zunächst die elektrische Energie in mechanische und dann wieder mechanische Energie in elektrische zurück verwandelt werden muß, kommt das Produkt des Wirkungsgrades beider Maschinen, des Wechselstrommotors und des Gleichstromerzeugers, in Betracht; man wird daher selbst in den günstigsten Fällen einen höheren Nutzeffekt als etwa 85 % kaum erreichen können. Ein Vorzug der Motorgeneratoren ist es ferner, daß die Spannung ganz unabhängig von der Belastung wie bei jeder anderen Dynamomaschine geregelt werden kann.

Bei den rotierenden Umformern dagegen, die in der Hauptsache Gleichstrommaschinen sind, die nach dem bereits früher (vergl. Kap. 11, 19., S. 178) angegebenen Verfahren zur Aufnahme oder Abgabe von Wechselstrom geeignet gemacht worden sind, kann man unter günstigen Umständen einen Wirkungsgrad von 92 % erreichen. Der Nachteil ist jedoch der, daß Wechselstrom und Gleichstrom hinsichtlich der Höhe der Spannung aneinander gebunden sind. Man wird, wenn man die Energieübertragung auf größere Entfernung mit sehr hoher Spannung durchführen will, daher nicht umhin können vor der Einführung in den rotierenden Umformer den Wechselstrom durch Zwischenschaltung eines Transformators auf die passende Spannung zu bringen. Dadurch gehen ebenfalls einige Prozent (durchschnittlich etwa 5 %) der übertragenen Leistung verloren.

Bei den rotierenden Umformern ist der Wirkungsgrad daher im allgemeinen höher als bei Motorgeneratoren. Es ist nur ein Anker vorhanden, der zwischen einem System von Feldmagneten rotiert. Diese Ankerwicklung wird gleichzeitig von Gleichstrom und Wechselstrom durchflossen. Der Ankerwicklung wird z. B. durch Schleifringe Wechselstrom auf der einen Seite zugeführt; auf der anderen Seite wird durch Bürsten, die auf einem Kommutator schleifen, Gleichstrom abgegeben. Fig. 493 zeigt beispielsweise für eine zwei-

¹⁾ Synchronmotoren haben unter sonst gleichen Verhältnissen einen etwas höheren Wirkungsgrad als asynchrone Motoren.

polige Maschine mit Ringanker in a) die Gleichstromseite, in b) die Seite des Ankers mit den Schleifringen zur Aufnahme des Wechsel-

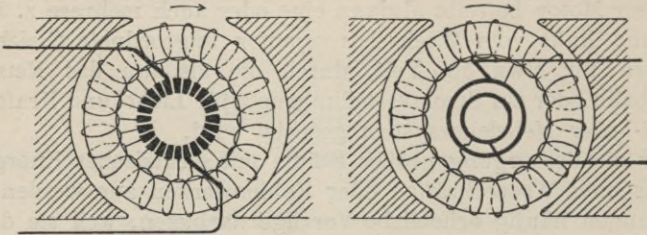


Fig. 493 a. Gleichstromseite eines rotierenden Umwandlers.

Fig. 493 b. Wechselstromseite eines rotierenden Umwandlers.

stromes, nebst den zugehörigen Verbindungen der Wicklung mit Kollektor und Schleifringen. Fig. 494 zeigt einen Durchschnitt durch einen rotierenden Umformer mit 6 poligem Felde.

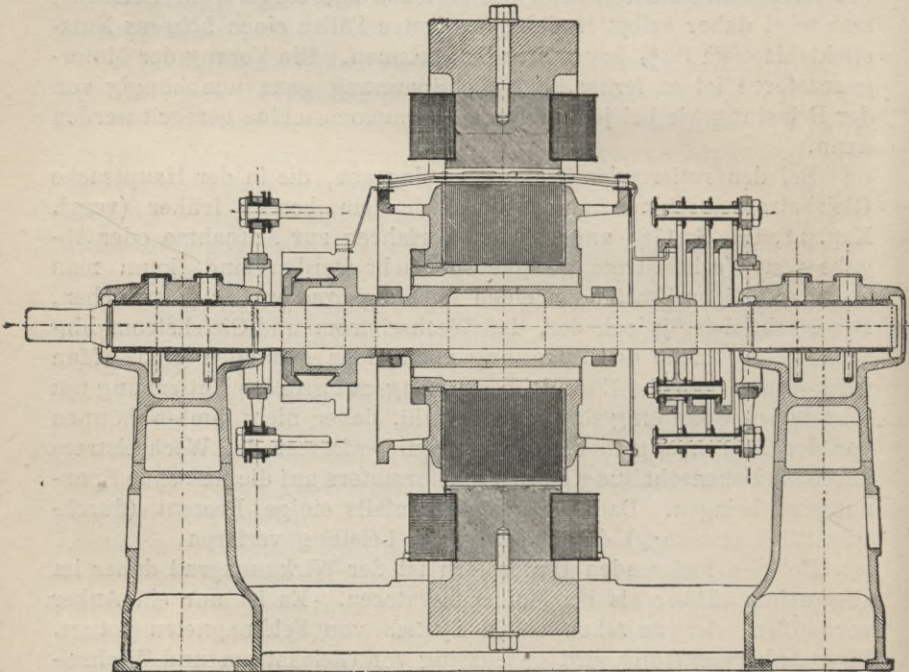


Fig. 494. Rotierender Umformer von W. Lahmeyer & Co., A.-G., Frankfurt a. M.

Fig. 495 zeigt die äußere Erscheinung dieses rotierenden Umformers der E.-A.-G. vorm. W. Lahmeyer & Co., der zur Umformung von Wechselstrom in Gleichstrom bestimmt ist.

Rotierende Umformer für einphasigen Wechselstrom und Gleichstrom haben die unangenehme Neigung ein Pendeln des Ankers zu

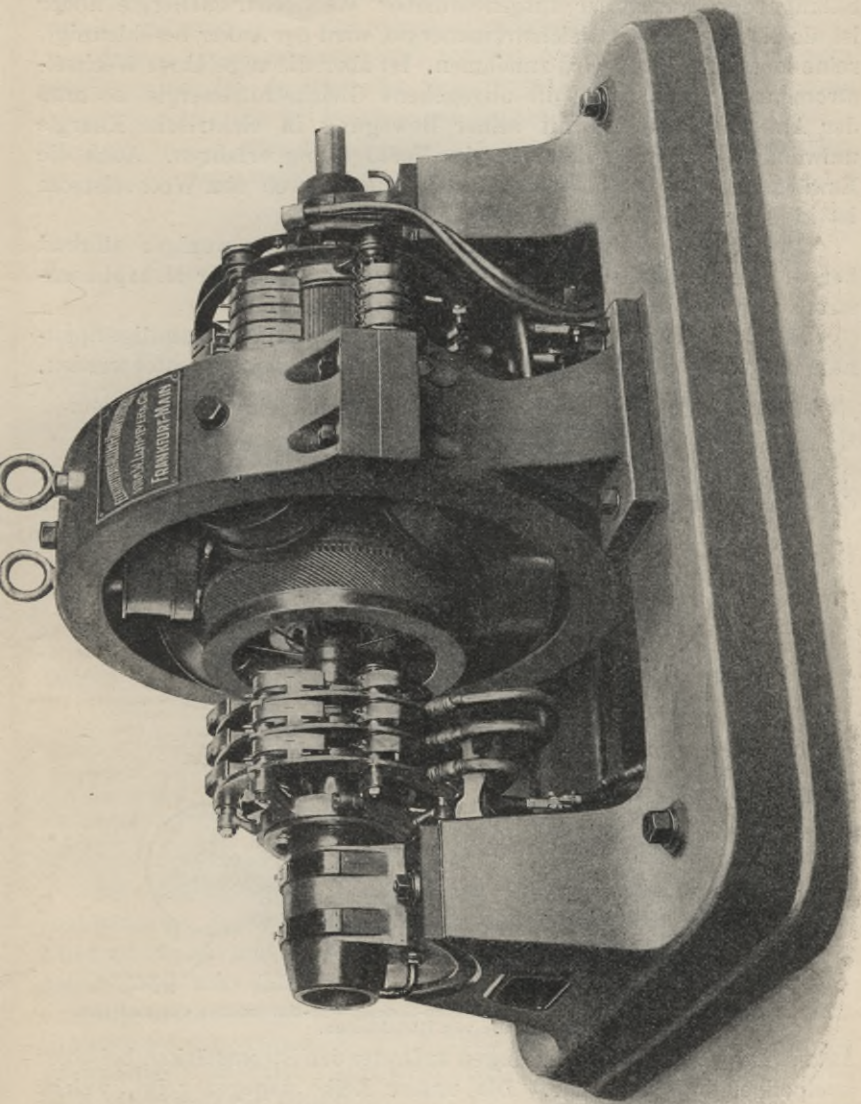


Fig. 495. Rotierender Umformer von W. Lahmeyer & Co., A.-G., Frankfurt a. M.

veranlassen, da die zugeführte Wechselstromenergie innerhalb jeder Wechselstromperiode zweimal zwischen null und einem Höchstwerte schwankt, während die abgegebene Gleichstromenergie gleich bleibt. Solange der Betrag der aufgenommenen Wechselstromenergie höher ist als die abgegebene Gleichstromenergie, wird der Anker beschleunigt, seine lebendige Kraft wird zunehmen. Ist aber die zugeführte Wechselstromenergie kleiner als die abgegebene Gleichstromenergie, so muß der Anker lebendige Kraft seiner Bewegung in elektrische Energie umwandeln und wird dadurch eine Verzögerung erfahren. Auch die Erwärmung der verschiedenen Ankerspulen durch den Wechselstrom ist in diesem Falle sehr ungleich.

Bei Mehrphasenstrom treten diese Übelstände weniger störend hervor, und deshalb werden Umwandler meist nur für Mehrphasenstrom (am besten für Sechshephasenstrom) verwendet.

Bei diesen Apparaten kann ohne Schwierigkeit eine selbsttätige Spannungsregelung in Abhängigkeit von der Belastung eingerichtet werden.

2. Verteilung von Spannung und Strom bei einem Drehstrom-Gleichstromumwandler.

Die Figurenreihe 496 stellt unter der Annahme, daß der Anker des Drehstrommotors synchron läuft, in der oberen Reihe die in dem

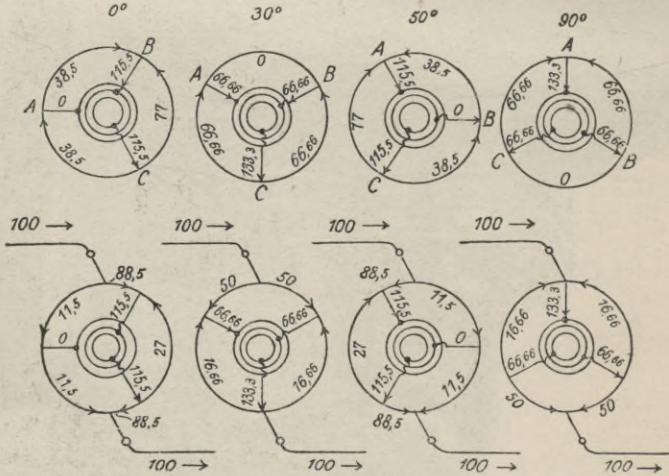


Fig. 496. Stromstärke in einem Dreiphasen-Gleichstrom-Umwandler vor und nach Entnahme von Gleichstrom.

Anker in verschiedenen Stellungen auftretenden Stromstärken bei einer zweipoligen Maschine dar. Die untere Reihe dagegen zeigt, welche Änderungen dadurch herbeigeführt werden, daß die Bürsten Gleichstrom vom Kommutator abnehmen. Von allen Verlusten ist abgesehen, und die Stärke des Gleichstromes ist gleich 100 gesetzt.

Die Wechselspannung ist stets niedriger als die Gleichstromspannung. Nimmt man für den Verlauf von Spannung und Strom beim Wechselstrom rein sinusidalen Verlauf an, so lassen sich die effektiven Spannungen und Stromstärken leicht durch die Spannung E und die Stromstärke J des Gleichstromes ausdrücken.

Haben wir einen Umformer, der mit Wechselstrom von f Phasen gespeist wird, bei welchem für jedes Polpaar f gleichweit entfernte Kommutatorlamellen mit f Gleitringen verbunden sind, so ist die effektive Stromspannung, oder die effektive Spannung zwischen dem neutralen Punkte und dem Schleifringe:

$$E_{\text{eff}} = \frac{E}{2\sqrt{2}} \dots \dots \dots 1)$$

Die Spannung zwischen zwei benachbarten Schleifringen ist:

$$E'_{\text{eff}} = \frac{E \cdot \sin \frac{\pi}{f}}{\sqrt{2}} \dots \dots \dots 2)$$

Der Linienstrom ist dann:

$$J_{\text{eff}} = \frac{2\sqrt{2}}{f} \cdot J \dots \dots \dots 3)$$

und der von einem Schleifringe zum benachbarten in der Ankerwicklung fließende Strom ist:

$$J'_{\text{eff}} = \frac{\sqrt{2}}{f \cdot \sin \frac{\pi}{f}} \cdot J \dots \dots \dots 4)$$

Daraus ergeben sich für verschiedene Werte der Anzahl der Phasen f folgende Zahlwerte (in Prozenten von E und J):

	Einphasenstrom	Dreiphasenstrom	Vierphasenstrom	Sechsphasenstrom
Sternspannung	35,4	35,4	35,4	35,4
Spannung zwischen benachbarten Schleifringen	70,7	61,2	50	35,4
Linienstrom	141,4	94,3	70,7	47,2
Strom zwischen benachbarten Schleifringen	141,4	54,5	50	47,2

Bei allen Umformern kommt nur der Unterschied der Ankerückwirkung des Wechsel- und Gleichstromes zur Geltung. Die Funkenbildung und Bürstenverschiebung auf der Gleichstromseite ist daher meist sehr gering.

Die starke Funkenbildung bei den auch aus vielen anderen Gründen weniger zweckmäßigen Einphasen-Wechselstrom-Gleichstrom-Umwandlern ist darin begründet, daß die Ankerrückwirkung innerhalb jeder Periode schwankt.

Die Umdrehungszahl des Ankers hängt in allen Fällen von der Periodenzahl des Wechselstromes und der Polzahl ab; um nicht un-

zulässig hohe Umdrehungszahlen zu erhalten, wird man daher zumeist vielpolige Maschinen benutzen. Ist der Wechselstrom der primäre, so ist daher bei Synchronismus die Ankergeschwindigkeit konstant. Ist aber der Gleichstrom der primäre, so ist die Geschwindigkeit,

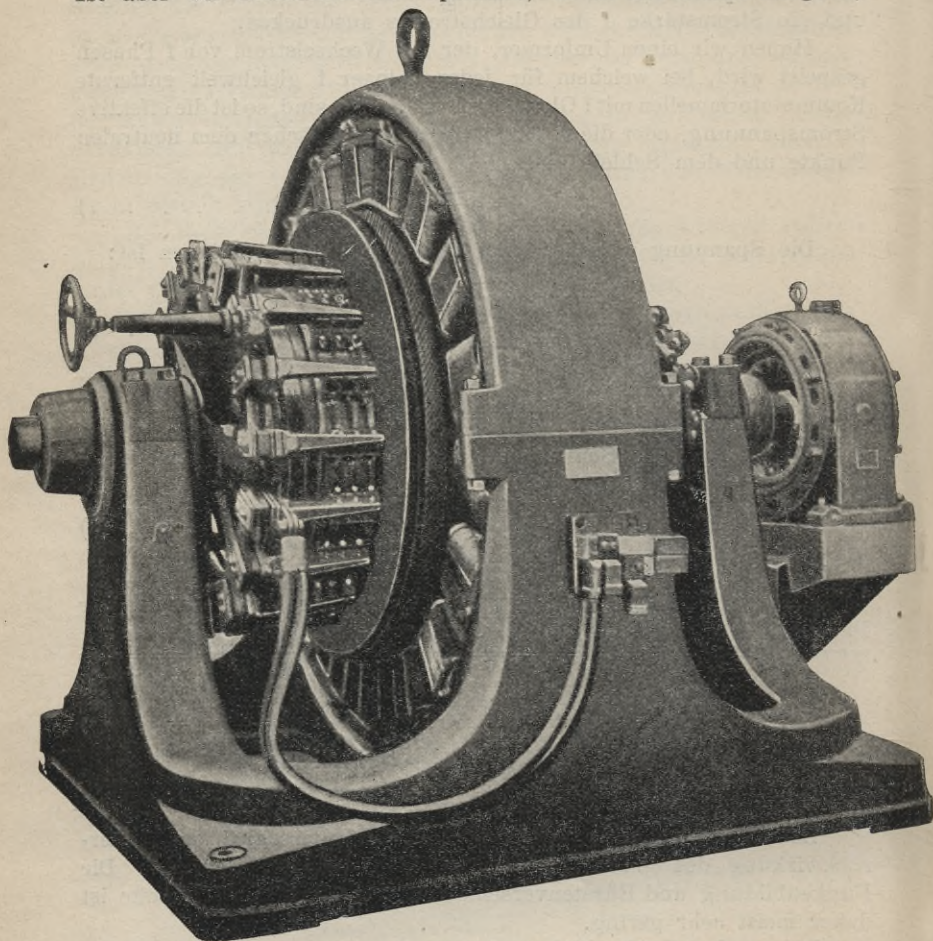


Fig. 497. Rotierender Umformer der Westinghouse Co. von Wechselstrom in Gleichstrom für 75 Kilowatt mit Zusatzmaschine.

mit der sich der Anker bewegt, abhängig von der Feldstärke. Dann ist die Spannung des Wechselstromes von Anfang an konstant, aber die Periodenzahl ändert sich mit der Geschwindigkeit.

Die Mehrphasenumformer laufen, unbelastet, von selbst unter

dem Einfluß des Wechselstromes an, meist aber werden sie durch Hilfsvorrichtungen zum Angehen gebracht. Während des Anlaufes muß, um unzulässig hohe Spannungen in den Erregerwickelungen zu vermeiden, die Erregung ausgeschaltet bleiben. Wenn die synchrone Umdrehungszahl erreicht ist, wird die Erregerwicklung geschlossen und der Strom in Phase gebracht.

Steht eine Akkumulatorenbatterie (Bufferbatterie) auf der Gleichstromseite zur Verfügung, so wird man den Umwandler anlassen, indem man die Gleichstrommaschine als Motor benutzt und, nachdem Synchronismus erreicht und Phasengleichheit hergestellt ist, die Wechselstromseite an das Netz anschalten.

Durch Verstärkung der Erregung kann man die Spannung des Gleichstromes meist soweit erhöhen, daß die Maschine ohne weiteres zum Laden einer Akkumulatorenbatterie verwendet werden kann. Vielfach aber bringt man auf der Welle des Umwandlers noch eine kleine Zusatzmaschine an, durch die man die beim Laden einer Akkumulatorenbatterie erforderliche Erhöhung der Spannung des Gleichstromes bewerkstelligt. (Vergl. Fig. 497.)

Bei Dreiphasen-Umwandlern bilden die drei Drittel der Wickelung des Ankers in bezug auf die Speiseleitung ein Dreieck. Stellt man die drei Maxima der EMK nach Größe und Phase durch die drei Seiten eines gleichseitigen Dreieckes dar, so repräsentiert der Durchmesser des umschriebenen Kreises den Spannungsunterschied an zwei um 180° verschiedenen Stellen. Man erhält daher für die effektiven Dreiphasenspannungen:

$$E_3 = \frac{E \sqrt{3}}{2 \sqrt{2}} = 0,612 E \quad 5)$$

Ist J_3 der von den Schleifringen abgenommene Strom und J'_3 die Stromstärke in jeder der drei Wickelungsdrittel, so muß, Phasengleichheit von Strom und Spannung vorausgesetzt:

$$3 E_3 \cdot J'_3 = E \cdot J = \sqrt{3} \cdot E_3 \cdot J_3$$

sein, und daraus folgt für die effektive Stromstärke in den Leitungen:

$$J_3 = \frac{2 \sqrt{2}}{3} J = 0,943 J \quad 6)$$

3. Die Erwärmung des Ankers bei Umwandlern.

Der Verlust durch Stromwärme nach dem Jouleschen Gesetze entspricht der Differenz zwischen dem zugeführten Wechselstrom und dem nach außen abgegebenen Gleichstrom. Diese Differenzströme sind in verschiedenen Ankerspulen von ungleicher Größe.

Wir betrachten der Einfachheit wegen wieder einen zweipoligen Umwandler. Die Bürsten mögen ohne Verschiebung auf den neutralen

Stellen des Kollektors aufrufen; die Ankerwicklung soll in eine der Anzahl der Schleifringe, beziehentlich Phasen entsprechende Zahl gleicher Teile geteilt sein.

Wenn die Wickelung lediglich vom Wechselstrom durchflossen wird, verläuft in einer Ankerspule, wir wollen als Beispiel die mittelste Windung einer Phase wählen, ein sinusoidal Strom, der durch die gestrichelt gezeichnete Sinoide a b c d e (Fig. 498) dargestellt wird.

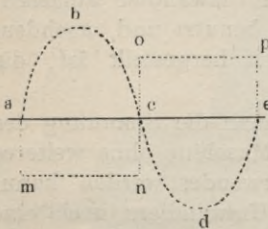


Fig. 498. Gleichstrom- und Wechselstrom in der mittelsten Spule der Phasen.

Die Maximalwerte bei b und d werden erreicht, wenn die entsprechende Phase der Wickelung an den Polen vorüber geht, die Nullwerte a, c, e treten ein, wenn die Spule durch die neutrale Stelle hindurch geht.

Betrachtet man nun aber die Maschine als Gleichstromerzeuger, so wird der in derselben Spule fließende Gleichstrom durch die gebrochene, punktierte Linie a m n c o p e dargestellt.

Die hier gezeichnete Figur, die für die mittelste Windung einer Phase gilt, kann auf die anderen Windungen übertragen werden, wenn man die gebrochene Linie a m n o p c jedesmal um soviel seitlich verschiebt, als dem Winkelabstande der Windung von der mittelsten Windung der Phase entspricht.

Wenn man dies für alle Windungen der Phasenwicklung wiederholt, kann man den gesamten Verlust durch Stromwärme finden. Auf diese Weise ergibt sich, daß wenn man den Verlust durch Stromwärme gleich 100 setzt, wenn die Maschine nur als Gleichstrommaschine bei gleicher Stromstärke und Spannung arbeitet, der Verlust durch Stromwärme,

wenn die Maschine als	Einphasenstrom-Gleichstromumwandler	arbeitet	137
» » » »	Dreiphasenstrom-Gleichstromumwandler	»	55
» » » »	Sechsphasenstrom-Gleichstromumwandler	»	37

beträgt.

Die Leistung desselben Ankers bei der gleichen Gesamterwärmung ist für verschiedene Systeme sehr verschieden; wie nachstehende Zusammenstellung zeigt,¹⁾ (unter der Annahme, daß die Wechselströme sinusoidal verlaufen):

Gleichstrommaschine	100 %
Einphasenumwandler	85 %
Dreiphasenumwandler	134 %
Vierphasenumwandler	136 %
Sechsphasenumwandler	196 %

¹⁾ Die ausführlichere Begründung findet man in der trefflichen Schrift: Steinmetz, Der rotierende Umformer, Voits Sammlg. elektrot. Vortr. Bd. II.

4. Die Ankerrückwirkung.

Da die Ankerrückwirkung ebenfalls von der jeweiligen Differenz der Stromstärke abhängt, ist dieselbe bei Mehrphasenumwandlern viel kleiner, als wenn eine solche Maschine nur als Wechselstromerzeuger oder, als wenn sie lediglich als Gleichstrommaschine tätig ist. Eine solche Maschine kann daher auch wesentlich mehr elektrische Energie umwandeln, als sie bei gleicher Größe und gleicher Inanspruchnahme des Materiales zu erzeugen imstande sein würde.

Die Belastungsgrenze ist vorzugsweise durch die Erwärmung des Kollektors gegeben, dem man deshalb, wie auch die Abbildungen zeigen, eine verhältnismäßig große Oberfläche gibt.

Die Bürsten stehen in der geometrischen neutralen Zone; es gibt somit keinen entmagnetisierenden Gegenstrom; die Differenz der Stromstärken erzeugt aber Querwindungen im Anker (vergl. Gleichstromtechnik Kap. XX, 8, S. 411), und die dadurch hervorgerufene Quermagnetisierung pulsiert je nach der Stellung der Wickelung zu den Polstücken; dadurch entsteht Funkenbildung am Kollektor unter den Bürsten, und gleichzeitig werden dadurch Wirbelströme in den Polstücken hervorgerufen.

Besonders häufig tritt diese Funkenbildung lebhaft auf, wenn man Umwandler in Parallelschaltung verwendet; gleichzeitig zeigen sich in solchen Fällen Schwankungen der Spannungen und der Stromstärken, über deren Ursache man sich noch nicht völlig klar ist. Um diese Funkenbildung zu vermeiden, schlägt E. Thomson vor, einen Kollektor mit ungleich breiten Lamellen zu verwenden.¹⁾

Steinmetz hat, um diese Schwankungen des Kraftlinienflusses in der Nähe der neutralen Zone zu mindern, vorgeschlagen die Polstücke an ihrer Oberfläche nach dem von Hutin und Le Blanc eingeführten System (vergl. S. 570) mit Kurzschlußwickelungen zu versehen. Die in Fig. 497 dargestellten Umwandler der Westinghouse Co. tragen z. B. zwischen den Feldmagneten aus starken Kupferstäben hergestellte, einem Roste ähnliche Gitter. In der Tat wird das Magnetfeld dadurch gleichförmiger, aber der Wirkungsgrad der Maschinen nimmt um einige Prozent ab.

Die Ankerrückwirkung entspricht jedoch nicht der Differenz, sondern der Summe der Ströme, wenn man den Anker eines Umwandlers durch Zuführung mechanischer Energie einer Antriebsmaschine in Umdrehungen versetzt und gleichzeitig den Bürsten, die auf dem Kollektor schleifen, Gleichstrom und den Schleifringen Wechselstrom entnimmt, die Maschine also gleichzeitig als Strom-

¹⁾ ETZ 1901, Heft 20, S. 420.

erzeuger für Gleichstrom und Wechselstrom benutzt.¹⁾ Man erhält dann auf der Gleichstromseite durch das Auftreten kräftiger Querwindungen im Anker einen starken Spannungsabfall und es wird, um übermäßiger Funkenbildung am Kollektor vorzubeugen, eine starke Verschiebung der Bürsten notwendig.

Immerhin ist es wertvoll, daß man Umwandler für verschiedene Zwecke gebrauchen kann, einmal um Wechselstrom in Gleichstrom umzuwandeln, ferner um Gleichstrom in Wechselstrom umzusetzen²⁾ und endlich, um gleichzeitig Gleichstrom und Wechselstrom zu erzeugen oder sie als Gleichstrom- oder Wechselstrommotoren zu verwenden. Solche Maschinen können daher für manche Elektrizitätswerke eine wertvolle Maschinenreserve bilden.

Besonders die Westinghouse Company hat sich um die Ausbildung der Umwandler große Verdienste erworben und dieselben in einer großen Anzahl bedeutender Stromverteilungsanlagen mit bestem technischen Erfolg zur Anwendung gebracht.

5. Die Compoundierung der Umformer.

Solange die Spannung des zugeführten Wechselstromes unveränderlich bleibt, hält sich auch die Gleichspannung unveränderlich, wie stark auch der Magnetisierungsstrom der Feldmagnete, der Erregerstrom, sein mag.

Die Änderung der Erregung des Synchronmotors beeinflußt jedoch bekanntlich (vergl. Kap. 19, 6., S. 354) die Phasendifferenz zwischen Strom und Spannung. Vermindert man die Erregung, so entsteht eine der Spannung nacheilende wattlose Komponente des Stromes, die das Feld verstärkt.

Vielfach ist es nun nötig die Spannung mit wachsender Stromstärke zu erhöhen, z. B. bei Umwandlern, deren Gleichstrom die Speiseleitungen eines Verteilungsnetzes mit Strom versorgt, um den mit der Stromstärke wachsenden Spannungsverlust in den Leitern auszugleichen.

Um eine Regelung auf konstante Spannung an den Verbrauchspunkten (Speisepunkten) zu erhalten, schaltet man in die Leitungen, durch die der Wechselstrom zugeführt wird, Drosselspulen, die eine passende Selbstinduktion besitzen.

¹⁾ Diesen Fall der sogenannten Doppelstromgeneratoren hat neuerdings Horschitz, ETZ, 1904, S. 21, eingehend theoretisch behandelt.

²⁾ Bei der Umsetzung von Gleichstrom in Wechselstrom ist allerdings fort-dauernde Beaufsichtigung nötig, da die Umdrehungsgeschwindigkeit des Ankers bei konstanter Spannung von der Feldstärke abhängt, und diese durch die Ankerrückwirkung geändert werden kann. Die Ankerrückwirkung hängt aber ab von der Stärke der wattlosen Ströme, die das Netz liefert.

Eine Drosselspule erzeugt, wenn sie vom Wechselstrom durchflossen wird, eine EMGegenkraft, die dem Strom um 90° nacheilt. Ist nun der Strom selbst um 90° gegen die Betriebsspannung verzögert, so sind GegenEMK und Betriebsspannung gerade von entgegengesetzter Phase.

Veranlaßt der Umwandler eine wattlose Komponente, die der Spannung um 90° voraus eilt, so erhöht die EMGegenkraft der Drosselspule die Netzspannung, ist dagegen die wattlose Komponente in der Phase verzögert, so wirkt die EMGegenkraft schwächend.

Durch Änderung der Feldstärke der Erregermagneten kann man den Phasenunterschied zwischen Wechselspannung und Wechselstrom beeinflussen, wenn man zur Erzeugung des Feldes teils vom erzeugten Gleichstrom selbst durchflossene Ampèrewindungen, teils solche benutzt, die im Nebenschluß liegen. Durch Zusammenwirken von Drosselspulen in der Zuführungsleitung des Wechselstromes und Änderung der Erregung durch Benutzung einer gemischten Wickelung für die Feldmagnete kann eine selbsttätige Spannungsregelung an den Speisepunkten erzielt werden.

Wenn ein rotierender Umformer mit Gleichstrom gespeist wird und Wechselstrom liefert, so ist seine Umdrehungszahl nicht mehr konstant, sondern hängt ab von der Erregerstromstärke und der Wirkung zwischen Feld und Ankerstrom. Die Ankerrückwirkung ist gelegentlich sehr bedeutend, wenn Wechselstrom von erheblicher Phasendifferenz vorkommt. Wegen der Schwächung des Feldes, die dann eintritt, könnte die Geschwindigkeit in weiten Grenzen schwanken und damit wäre die Periodenzahl veränderlich.

Da mit gesteigerter Periodenzahl die Feldrückwirkung wächst, wäre die Gefahr einer unzulässigen Geschwindigkeitszunahme, die Gefahr des Durchgehens des Umformers nicht ausgeschlossen.

Gegen diese Gefahr schützt man sich dadurch, daß man für die Erregung eine auf der Ankerachse montierte Dynamomaschine verwendet, deren Feldmagnete weit von der Sättigung entfernt sind. Wächst nun die Geschwindigkeit über die normalen Verhältnisse, so steigt die Spannung des Erregerstromes sehr erheblich und verstärkt das Magnetfeld des Umformers so energisch, daß eine weitere Geschwindigkeitszunahme des Ankers nicht stattfinden kann. Man kann es auf diese Weise leicht dahin bringen, daß die Geschwindigkeit selbsttätig nahezu konstant erhalten wird.

6. Der Umwandler von Le Blanc.

Eine auf ganz anderer Grundlage beruhende Art von Apparaten zur Umwandlung von Wechselstrom in Gleichstrom hat Le Blanc erfunden und unter dem Namen »transformateur redresseur« erfolg-

reich in die Praxis eingeführt. Derselbe transformiert nicht nur die Spannung, sondern verwandelt auch die Stromart.

Es ist dies ein ruhender Transformator besonderer Art, der außer der primären und sekundären Wickelung noch zwei besondere Ausgleichswickelungen trägt. Die sekundären Wickelungen sind an die Lamellen eines vielteiligen Kollektors angeschlossen, auf welchem Bürsten schleifen, die durch einen vom Wechselstrom durchflossenen Synchronmotor zur Rotation auf dem Kollektor gebracht werden.

Der Transformator besteht aus zwei konzentrischen Eisenblechringen, von denen der innere eine größere Zahl von Nuten trägt. In diesen Nuten sind die primären, die sekundären und zwei kompensierende Wickelungen untergebracht. Die primären Spulen sind unter sich gleich und werden an zwei Punkten an eine Wechselstromleitung, bezw. mit vier Punkten an Zweiphasenleitungen angeschlossen. Die gleiche Anzahl von Sekundärspulen sind unter sich auch gleich und werden unter Zuhilfenahme von Querverbindungen mit den Lamellen des Kollektors verbunden. Bei den Kompensationskreisen wechselt die Windungszahl in jedem Kreise und jeder Nute sinusartig um den Umfang des Ringes derart, daß bei $2k$ Nuten die Windungszahlen der x ten Nute im 1. und 4. Quadranten

bei Kreis I $n_1 = \nu \cdot \sin \frac{2\pi}{2k} x$ bei Kreis II $n_2 = \nu \cdot \cos \frac{2\pi}{2k} \cdot x$
im 2. und 3. Quadranten

bei Kreis I $n_3 = \nu \cdot \cos \frac{2\pi}{2k} \cdot x$ bei Kreis II $n_4 = \nu \cdot \sin \frac{2\pi}{2k} \cdot x$
sind.

Die Enden von n_1 in der x ten Nute werden jeweils mit den Enden von n_4 in der $\left(x + \frac{k}{2}\right)$ ten Nute, die Enden von n_2 in der x ten Nute mit den Enden von n_3 in der $\left(x + \frac{k}{2}\right)$ ten Nute zu Kompensationskreisen verbunden.

Alle diese resultierenden Kompensationskreise besitzen gleiche EMK und werden zu zwei Schleifringen I und II für die ersten und III und IV für die zweiten Kreise geführt.

Von diesen Schleifringen aus kann die Ständerwicklung eines zweiphasigen Synchronmotors gespeist werden und wird der kleine Synchronmotor gespeist, der die rotierenden Bürsten bewegt. Das Bürstenmotorfeld kann durch ein Handrad verstellt werden.

Bei einem derartigen Apparat, den die E. A.-G. Helios gebaut hat, wird z. B. Wechselstrom von 3500 Volt zugeführt und Gleichstrom von 120 Volt, ohne erhebliche Funkenbildung, am Kollektor abgegeben.

Wir verzichten auf die nähere Beschreibung dieser verwickelten Apparate. Vorrichtungen mit rotierenden Bürsten haben zunächst wenig Aussicht in der Praxis allgemeinere Anwendung zu finden.¹⁾

7. Pollaks Gleichrichter für Wechselstrom.

Um Wechselstrom in einen intermittierenden Gleichstrom zu verwandeln, genügt es auf die Achse eines kleinen Wechselstrommotors, der mit dem Stromerzeuger genau synchron läuft, einen Stromwender aufzusetzen und diesem durch Bürsten den Gleichstrom zu entnehmen.

Die einzelnen Segmente eines solchen Kommutators sind voneinander isoliert und abwechselnd unter sich und mit zwei auf der Achse befindlichen, von der Achse und voneinander isolierten Schleifringen verbunden, denen der Wechselstrom zugeführt wird.

Die nebenstehende Fig. 499 erläutert die Einrichtung eines solchen Kommutators. Die Arme 1, 2, 3, 4 bilden die einen Segmente, sie sind auf geeignete Weise mit dem einen Schleifringe verbunden; 5, 6, 7, 8 sind die abwechselnd dazwischen liegenden Segmente, die ihrerseits mit einem anderen Schleifringe in leitender Verbindung stehen und von den erstgenannten Segmenten durch eine isolierende Zwischenschicht getrennt sind. Die äußeren Flächen der Kommutatorsegmente sind so gestaltet, daß eine durch Luftzwischenräume unterbrochene Zylinderfläche entsteht.

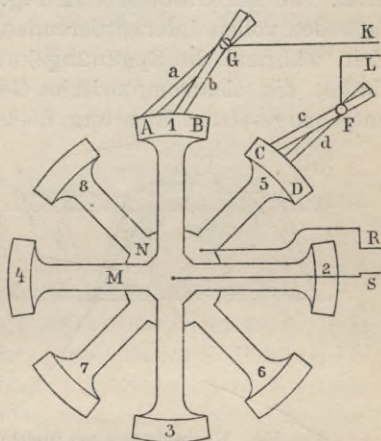


Fig. 499. Einrichtung des Pollakschen Gleichrichters für Wechselströme.

Durch die Leitungen R und S wird den beiden Segmentgruppen Wechselstrom zugeführt.

Zur Abnahme des Gleichstromes dienen Bürstenpaare a b und c d. Die Entfernung der Enden der untereinander verbundenen gleichnamigen Bürsten kann nach Bedarf geregelt werden. Erfolgt der Übergang der Bürste b auf das Segment 5 bei C gleichzeitig mit dem Übergange der Bürste d auf das Segment 2 und in demselben Augenblicke, in dem die Bürste a das Segment 1 bei B und die

¹⁾ Nähere Mitteilungen über diese interessante Erfindung findet man in: Bulletin de la Société International des Électriciens, Jahrg. 1899, ferner auch Abbildungen, Beschreibung und Theorie in dem Aufsätze von Feldmann: Neuer Umformer von Le Blanc, ETZ 1901, S. 806. Vergl. auch Electrician 1894, Bd. 7, S. 254, sowie D. R. P. 78825 und 82383.

Bürste c das Segment 5 bei D verläßt, geschieht dieser Wechsel ferner in dem Zeitpunkte, in dem der Wechselstrom durch null hindurch geht, so vollzieht sich der Richtungswechsel des Stromes an den Bürsten ohne nennenswerte Funkenbildung an den Auflagestellen.

Für gewöhnlich soll gleichgerichteter Wechselstrom zum Laden von Akkumulatoren oder zum Betriebe von Gleichstrommotoren dienen. Beide entwickeln eine gewisse elektromotorische Gegenkraft, z. B. von der Größe MN in Fig. 500. Dann würde, wenn man einfach den vollen intermittierenden Gleichstrom benutzen wollte, in der Zeit, während die Spannungskurve sich unterhalb der Linie MN befindet, die elektromotorische Gegenkraft überwiegen und einen in entgegengesetzter Richtung fließenden Strom veranlassen.

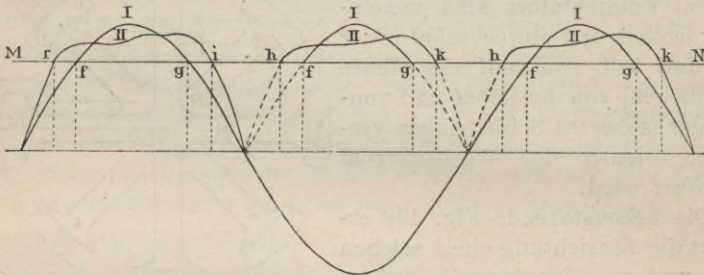


Fig. 500. Wechselstrom am Gleichrichter beim Laden von Akkumulatoren.

Der Kommutator muß daher derart eingerichtet werden, daß nur die über der Linie MN liegenden Teile fg der Spannungskurve zur Wirksamkeit kommen. Da außerdem z. B. beim Laden von Akkumulatoren die Spannungslinie MN um so höher hinauf rückt, je mehr die Ladung sich ihrem Abschlusse nähert, so muß die Zeit, während der der kommutierte Wechselstrom innerhalb einer vollen Periode zur Wirksamkeit kommt, verändert werden können.

Man muß den Strom gerade zu dem Zeitpunkte zu wirken anfangen lassen, zu dem die Spannung in der Kurve der Gegenspannung gleich ist. Nur wenn diese Forderung erfüllt ist, wird die Funkenbildung ein Minimum werden.

Der Gleichrichter von G. Pollak, der in Fig. 501 abgebildet ist, erfüllt diese Bedingung in befriedigender Weise. Derselbe wird von einem kleinen Synchronmotor angetrieben, und diesem wird durch einen kleinen Transformator der zu seinem Betriebe erforderliche Wechselstrom geliefert. Die Bürsten sind zunächst im ganzen drehbar; außerdem kann der Winkel zwischen den gleichnamigen Bürsten zwischen a und b, beziehentlich zwischen c und d (Fig. 499) verändert werden. Man kann daher durch Verschiebung der Stellung der Bürstenpaare auf den Segmenten und durch Änderung der Zeit-

dauer, während welcher Strom entnommen wird, also durch Veränderung des Winkels, den die gleichnamigen Bürsten einschließen, es dahin bringen, daß nur so lange Strom entnommen wird, als die EMK des kommutierten Wechselstromes wirklich größer ist als die der elektromotorischen Gegenkraft.

Die Form des gewöhnlich von einem Transformator gelieferten Wechselstromes (Kurve I, Fig. 499) ändert sich übrigens durch die Gegenwirkung und nimmt die flache, durch die Kurve II angedeutete Form an, von der die Stücke r i und h k zur Wirkung kommen. Die Verluste, die dadurch entstehen, daß nur ein Teil des Wechselstromes zur Verwendung kommt, sind nicht so groß, als man erwarten sollte.

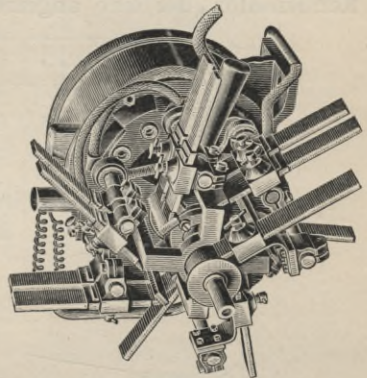


Fig. 501. Gleichrichter von Pollak.

Fig. 502 zeigt die Schaltung eines zum Laden von Akkumulatoren bestimmten Gleichrichters, der von einem Transformator aus mit Wechselstrom gespeist wird. Die Primärwicklung des Transformators empfängt hochgespannten Wechselstrom. Unterbrochener Gleichstrom wird vom Gleichrichter an eine Batterie, an Lampen und an Gleichstrom-Elektromotoren abgegeben.

Eine Anlage mit Gleichrichter ist sehr einfach, da sie keiner Fundamentierung bedarf und nur sehr wenig Raum beansprucht. Die Bedienung der Gleichrichter ist ebenfalls nicht schwierig und erfordert nicht mehr Aufmerksamkeit, als die einer Dynamomaschine.

Will man Gleichrichter zum Aufladen von Akkumulatoren verwenden, so hat man zu beachten, daß der vom Gleichrichter gelieferte Strom pulsierend ist, also gewissermaßen aus einem Gleichstrom mit übergelagertem Wechselstrom besteht. Da nun aber ein Akkumulator nicht nur Widerstand, sondern auch die Eigenschaft eines Kondensators besitzt, erfährt dieser übergelagerte Wechselstrom eine Phasenverschiebung. Da diese den Wirkungsgrad ungünstig beeinflusst, muß zu ihrer Aufhebung stets eine kleine Selbstinduktion vorgeschaltet werden.

Seitdem in den rotierenden Umformern bequemere und vielseitiger verwendbare Stromwandler geschaffen worden sind, dürften die Pollak'schen Gleichrichter nur noch in seltenen Fällen Anwendung finden.

8. Kochs Apparat

zur Entnahme von Gleichstrom aus Wechselstromquellen.

F. J. Koch¹⁾ benutzt für die Entnahme von Gleichstrom aus Wechselstromnetzen ein polarisiertes Relais, dessen Anker synchron

¹⁾ ETZ 1901, S. 853.

(in gleichem Takte) zur Periode des Wechselstromes schwingt. Der Anker hinkt jedoch infolge der Selbstinduktion der Unterbrecherspule und der Trägheit des Ankers naturgemäß der Phase des Wechselstromes nach. Man schaltet daher vor die Unterbrecherspule einen Kondensator, der eine angemessene Voreilung des Stromes vor der

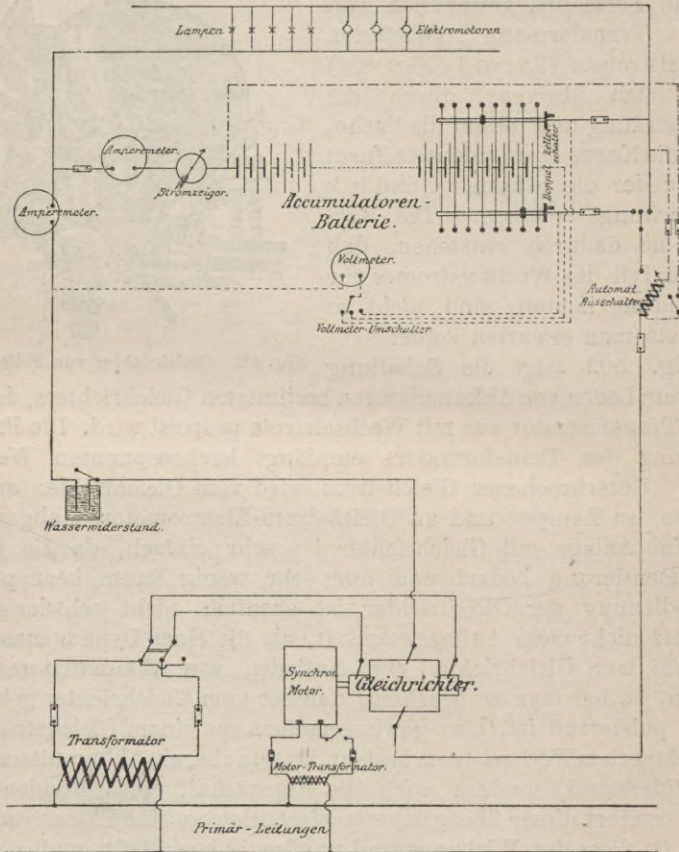


Fig. 502. Schaltungsschema für Gleichrichter.

EMK bewirkt. Es entsteht somit ein intermittierender und pulsierender Gleichstrom, ungefähr wie ihn die erste und dritte Welle der Kurve I in Fig. 500 darstellt.

Die zwischenliegende, nach unten gerichtete Halbwelle fällt jedesmal aus.

Die Schenkel des Unterbrechers werden außerdem mit einer zweiten Wickelung versehen, die einen Nebenschluß von hohem Wider-

stande zu der zu ladenden Batterie bildet und so bemessen ist, daß nur die Überspannung des Wechselstromes über die Batteriespannung kontaktschließend am Relais wirkt.

Um die Zeit des Stromschlusses in seiner Wirkung zu verlängern, wurde noch eine Drosselspule vor den ganzen Apparat vorgeschaltet.

Fig. 503 stellt den Apparat schematisch dar. T ist die Wechselstromquelle, H ein zweipoliger Ausschalter. Von H führt eine Leitung durch die Drosselspule D nach einem Schalter S mit drei Kontakten. Durch S wird der Wechselstrom sowohl der zu ladenden Akkumulatorenbatterie in B, als über P und K der unteren Schenkelbewicklung des Relais S zugeführt. Auf letzterem Wege liegt noch eine Spule P mit regelbarer Selbstinduktion.

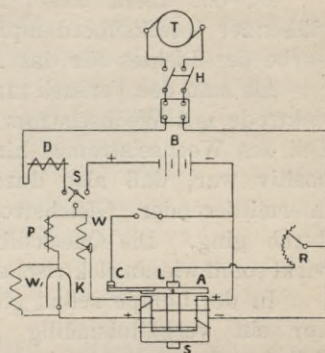


Fig. 503. Koehrs Apparat zur Entnahme von Gleichstrom aus Wechselstromquellen.

9. Die Quecksilberlampe als Gleichrichter für Wechsel- und Drehstrom.

Zuerst ist wohl von L. Aron, dem Erfinder des früher beschriebenen Uhrzählers, gezeigt worden, daß im stark luftverdünnten Raum zwischen zwei Quecksilberflächen, die mit den Polen einer Elektrizitätsquelle in Verbindung stehen, ein dauernder Lichtbogen in einem Glasgefäß erzeugt werden kann, und daß bei solchen Apparaten nur ungefähr $\frac{1}{2}$ Watt für die Lichtstärke einer Hefnereinheit verbraucht wird.

Später hat Cooper-Hewitt den zu Grunde liegenden Gedanken weiter verfolgt und eine der Quecksilber-Elektroden durch einen Stahlstab ersetzt, der in das den luftverdünnten Raum umschließende Glasrohr eingeschmolzen ist.

Eine solche Hewittlampe ist eine Glasröhre von 1,2 m Länge, an deren unterem Ende sich eine Kugel befindet, die Quecksilber enthält. Die Entzündung der Lampe erfolgt durch einen Induktionsfunken von hoher Spannung, den man von einer zweiten Stahlelektrode zum Quecksilber überschlagen läßt. Die normalen Hewittlampen bedürfen an den Klemmen eine Spannung von 80 Volt und arbeiten mit 3 Ampère Stromstärke. Da der Leitungswiderstand des Quecksilberdampfes mit steigender Stromstärke abnimmt, muß, um Überanstrengung durch zu starkes Erhitzen der Glaswand zu vermeiden, ein Ballastwiderstand vorgeschaltet werden, der ungefähr 20% der

Spannung konsumiert. Diese Quecksilberlampen können somit ohne weiteres an Stromverteilungsnetze von 100 bis 110 Volt angeschlossen werden.

Da das Licht dieser Lampen ein Linienspektrum zeigt, und glühender Quecksilberdampf wenig rote Linien enthält, erscheint die Farbe des Lichtes für das Auge unangenehm graublau.

Als man den Versuch machte, solche Quecksilberlampen mit Stahlelektrode mit Wechselstrom zu betreiben, zeigte sich, daß nur der Teil des Wechselstromes hindurch ging, bei dem die Stahlelektrode positiv war, daß also durch den Stromkreis der Lampe nur ein intermittierender Gleichstrom hindurch ging. Die Quecksilberlampe wirkt somit wie ein elektrisches Ventil.

In der Lampe selbst ging dabei nur ein verhältnismäßig geringer Teil der Spannung verloren.

Schaltet man hinter eine mit Wechselstrom betriebene Quecksilberlampe eine Akkumulatorenbatterie, so kann letztere, da der Strom nur in einer Richtung hindurchgeht, auf diese Weise geladen werden.

Weiterhin hat Hewitt gezeigt, daß passend eingerichtete Quecksilberlampen auch wohl geeignet sind mit wirtschaftlichem Erfolge Drehstrom oder Mehrphasenstrom in Gleichstrom zu verwandeln; man kann daher solche Lampen auch als Gleichrichter für Drehstrom benutzen. Für diese technisch nicht unwichtige Verwendung gebraucht Cooper-Hewitt kugelförmige Lampen, die mit vier Stahlelektroden und einer Quecksilberelektrode versehen sind. Eine der Stahlelektroden wird nur verwendet, um den Stromübergang im Quecksilberdampf durch den Unterbrechungsfunken eines Elektromagneten einzuleiten. Die drei anderen Stahlelektroden sind an die drei Klemmen einer in Sternschaltung angeordneten Drehstromquelle (Drehstrommaschine, sekundäre Wickelung eines Drehstromtransformators) angeschlossen. Die Quecksilberelektrode wird mit dem Nullpunkt dieser Drehstromquelle verbunden. Durch die Lampe fließt dann ein pulsierender Gleichstrom, dessen Spannung der Schenkelspannung des Drehstromes entspricht.

Die vorstehende Fig. 504 zeigt die Schaltung, wie sie zum Aufladen einer Akkumulatorenbatterie verwendet wird.

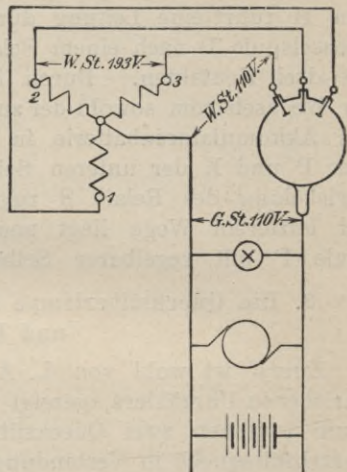


Fig. 504. Verwendung der Quecksilberlampe, um Drehstrom in Gleichstrom zu verwandeln.

Hewitt hat eine Lampe von 175 *mm* Durchmesser und 230 *mm* Länge im Gewichte von 1,4 *kg* dauernd mit 8 Kilowatt belastet und mit dem resultierenden Gleichstrom 200 Stück 16 kerzige Glühlampen gespeist.

Der Nutzeffekt soll sehr hoch und die Erwärmung der Lampe verhältnismäßig gering sein,¹⁾ da der Spannungsabfall in der Lampe nahezu unabhängig von der Betriebsspannung ist und konstant 14 Volt beträgt. Es sind Quecksilberlampen bereits als Gleichrichter für Spannungen von mehreren tausend Volt benutzt worden.

Für die Verwendung von Drehstrom zum Aufladen von Akkumulatoren im Anschluß an Drehstromverteilungsnetze, zumal aber für das Laden sogenannter Hochspannungsbatterien, wie solche in den meisten physikalischen Laboratorien benutzt werden, dürfte das hier beschriebene Verfahren jedenfalls Beachtung verdienen.

10. Grisson-Gleichrichter und -Umformer.

Den im Kap. 6, Abschn. 2, S. 80 erwähnten Aluminiumzellen mit unipolarer Leitfähigkeit hat neuerdings Grisson eine für praktischen Gebrauch in größerem Umfange geeignete Form gegeben.

Die wesentliche Abänderung gegen die früher von Grätz zur Umsetzung von Wechselstrom in Gleichstrom auf chemischem Wege verwendete Anordnung besteht darin, daß Grisson sowohl die unipolare Aluminiumelektrode als die bipolare Bleielektrode horizontal übereinander anordnet und nur eine beschränkte Stromdichte zuläßt.

Sehr häufig durchschlägt nämlich der Strom die einseitig isolierende Aluminiumoxydschicht, vielleicht infolge einer reduzierenden Wirkung des naszierenden Wasserstoffes, vielleicht auch weil die entstehenden Gasblasen das dünne Oxydhäutchen auflockern.

Bei horizontaler Anordnung, in der sich die Aluminiumplatte oben, die Bleiplatte unten befindet, dient nun die an der verletzten Stelle entstehende Gasblase selbst als isolierender Schutz, über der sich die Neuformierung der Aluminiumoxydschicht alsbald von selbst vollzieht.

Die untenstehende Abbildung Fig. 504 zeigt die Einrichtung der Grisson-Zellen. Damit die reichlich bemessene Flüssigkeitsmenge bei dem Durchgange größerer Stromstärken sich nicht zu stark erwärmt, werden Kühlschlangen eingehangen, die von kaltem Wasser durchströmt werden. Für Stromstärken bis 5 Ampère bedarf es bei einer Plattengröße von 25×25 *cm* dieser Kühlung jedoch nicht, wenn Metallgefäße zur Aufnahme der Flüssigkeit verwendet werden.

¹⁾ ETZ vom 5. März 1903, S. 187.

Die Zellen werden in der S. 80, Fig. 55 und Fig. 56 dargestellten Schaltung angeordnet. Für Drehstrom werden drei Gruppen von Zellen verwendet.

Die Gleichrichter arbeiten nach Mitteilungen Grissons mit einem Wirkungsgrad von 65% und genügen bei einer freien Oberflächengröße der Aluminiumplatte von 25×25 cm für die Umsetzung eines Stromes von 25 Ampère bei einer Spannung von 110 Volt.

Der pulsierende Charakter des auf diese Weise aus Wechselstrom erzeugten Gleichstromes wird sehr vermindert, wenn man dem Apparate, in dem der Gleichstrom verwendet wird, eine größere, derartige unipolare Aluminiumzelle als Kondensator parallel schaltet.

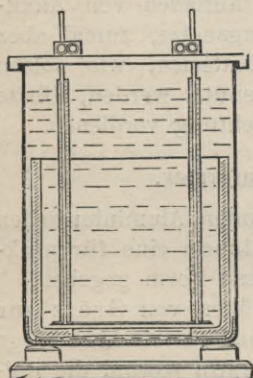


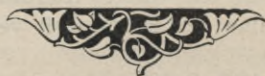
Fig. 505. Einzelzelle von Grissons Gleichrichter.

Da die die Aluminiumplatte bedeckende Aluminiumoxydschicht sehr dünn ist, bilden solche Zellen Kondensatoren von hoher Kapazität; man kann daher zu den S. 81 und S. 365 erwähnten Zwecken, um Phasenverschiebungen herbeizuführen, solche Zellen sehr gut als Kondensatoren in der Wechselstromtechnik verwenden.

Zur Umformung von Gleichstrom in Wechselstrom verwendet Grisson einen ruhenden Transformator mit zwei entgegengesetzten Primärwickelungen und einer Sekundärwickelung. Durch einen umlaufenden Kollektor wird abwechselnd der einen und der anderen Primärwickelung Strom zugeführt und dadurch der Eisenkern umpolarisiert. Die Periodenzahl des Wechselstromes ist durch die Anzahl der Lamellen des Kollektors und die Umlaufzahl desselben bedingt und kann nach Belieben verändert oder konstant gehalten werden.

Für gewisse Zwecke, zumal für die drahtlose Telegraphie, ist die Möglichkeit, in einfacher Weise die Periodenzahl des Wechselstromes in weiten Grenzen stetig verändern zu können, von Wert.

Über die Anwendbarkeit dieser Einrichtungen im großen liegen Erfahrungen zur Zeit noch nicht vor; für Laboratoriumszwecke und für den Versuchssaal verdienen sie aber jedenfalls Beachtung, da der Preis, die Unterhaltungskosten und der Raumbedarf solcher Aluminiumzellen nicht hoch sind.



Namen- und Sachregister.

(Die Zahlen beziehen sich auf die Seiten.)

- Abschalten parallel geschalteter Maschinen 557.
Abzweigtransformatoren 337.
Adler, Theorie der Kollektormotoren 448, 454.
Admittanz 77.
Aktien-Elektrizitäts-Gesellschaft Kummer & Co., Wechselstrommaschinen derselben 183.
» Zweiphasenmaschine ders. 252.
» Zweiphasenmotor ders. 368.
Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft, Induktormaschinen ders. 211, 217.
» Arbeitsmesser ders. 494.
» Drehstrommaschine 228, 233, 236.
» Präzisionsstrommesser 478.
» neuere Maschinenkonstruktionen 237.
» Drehstromtransformatoren 318.
» Drehstrommotoren 408.
» Stufenanker 410.
» Spannungsmesser 469, 471.
» Phasenmeter 503.
» Zähler 548.
Altern des Eisens 274.
Aluminiumzellen zum Gleichrichten von Wechselstrom 80, 608.
» als Kondensatoren 81, 608.
Ampèremeter 475, 546.
Anker der Wechselstrommaschinen, Einfluß d. Pol- u. Spulenbreite 149.
» Selbstinduktion derselben 160.
» der Drehstrommotoren 410.
Ankerrückwirkung und Selbstinduktion 155.
» bei Umformern 597.
Ankerwickelungen 156, 170, 174, 223, 224
Ankerkonstruktionen 170, 172, 176, 180, 191, 198, 202, 205, 216, 224, 234, 239, 241, 251.
Anlaßvorrichtung für Synchronmotoren 355.
» für Asynchronmotoren 411, 415, 421, 435.
Anlauf der Drehstrommotoren 379, 397.
Arbeit eines Wechselstromes 15, 162.
Arbeitsaufwand bei Wechselstrom-Bogenlampen 90.
Arbeitsdiagramm des Transformators 305.
Arbeitsfaktor bei Wechselströmen 112.
Arbeitsmessung bei Wechselstrom durch d. drei Ampèremeter-Methode 40.
» durch die drei Voltmeter-Methode 34.
» bei Wechselstrom 481.
» bei Drehstrom 481, 496.
» bei Zweiphasenstrom 501.
Arbeitsmesser von Siemens & Halske 481, 486.
» von W. Thomson 488.
» von Hartmann & Braun 536.
» der AEG 489, 494.
» von Weston 491.
Arbeitsverluste durch Hysteresis und Wirbelströme 107, 118, 272.
Arnö, Verteilungssystem für Wechselströme 585.
» Verschiebungstransformator 585.
Arnold, Berechnung von Wechselstrommaschinen 167.
» Vorausbestimmung des Spannungsabfalles von Wechselstrommaschinen 163.
» Polyzyklisches System 580.
» Theorie der Drehstrommotoren 378.
Aron, Zähler für Wechsel- und Drehstrom 535.
» Erfindung der Quecksilberlampe 605.
Arons, Untersuchungen über Lichtbogen 94.
Astatische Elektrodynamometer 462.
Asynchrone Generatoren 407, 449, 459.
Asynchronmotoren 370, 400, 432.
» als Stromerzeuger 405, 459.
» Anlaßvorrichtungen für dieselben 421.
Atkinson, Kollektormotoren 433. (Anm.)
Ausgleichsleiter bei Dreiphasenströmen 373
Ballistisches Galvanometer 329.
Bedell und Crehore 50.
Behn - Eschenburg, Bestimmung der Form der Wechselstromkurven 520.
» Versuche an Wechselstrommaschinen 163.

- Behn-Eschenburg, Stufenmotoren 424.
 Benischke, Rechnungen über Transformator 264.
 » Geschwindigkeitsanzeiger f. Drehstrommaschinen 565.
 » Pendeln von Wechselstrommaschinen 570.
 Berliner Maschinenbau-Aktien-Gesellschaft (vorm. Schwartzkopf), Drehstrommaschine 245.
 » Transformatoren 331.
 Blakey-Emmott, Wechselstrommaschine 189.
 Bláthy, Vervollkommnung der Transformatoren 260.
 » Parallelschaltung der Transformatoren 260.
 Blechstärken, deren Einfluß auf die Verluste im Eisen 117.
 Bogenlicht durch Wechselstrom 84.
 » Arbeitsaufwand dess. 90.
 » Zusammenhang der elektrischen Größen 91.
 » durch Gleichstrom 85.
 » Lichtentwicklung 89.
 Bradley, Verkettung der Ströme 371.
 Bragstadt, Bestimm. d. Kurvenform 131.
 » und La Cour, Messung wattloser Ströme 509.
 » Polyzyklisches System 580.
 Bremerlicht 92.
 Bremer-Bogenlampe 99.
 Braunsche Röhre 518 (Anm.).
 Brown, Anker der älteren Oerlikonmaschinen 223.
 Brown, Boveri & Cie., Wechselstrommaschinen 194.
 » Induktormaschinen 218.
 » Drehstrommaschine 227.
 » Wechselstromtransformatoren 322.
 » Drehstromtransformatoren 325.
 » Kurzschlußanker für Motoren 358.
 » Asynchronmotor 356, 370, 437.
 » Drehstrommotoren 408.
 » asynchrone Generatoren 459.
 Brugger, Wechselstromzähler 536.
 Burkhardt, Stufenmotoren 429.
 Charakteristik von Wechselstrommaschinen 248.
 Chemische Prozesse durch Wechselströme 4, 79.
 Compagnie de l'Industrie électrique, Induktormaschine ders. 209.
 Compound-Wechselstrommasch. 159, 458
 Cooper-Hewitt, Quecksilberlampe als Gleichrichter 605.
 Crehore und Bedell 50.
 Danielson, Kaskadenschaltung 430.
 » Erfindung der Asynchrongeneratoren 405.
 Darstellung von Wechslerscheinungen durch Vektoren 7.
 » periodisch veränderlicher Werte durch komplexe Größen 73.
 Déri, Vervollkommnung der Transformatoren 260.
 » Hintereinanderschaltung der Transformatoren 260.
 Diehlmann, Neuerungen an Wechselstrommaschinen 241.
 v. Dobrowolski, Verkettung d. Kraftlinien bei Transformatoren 317.
 » Drehstromwicklung 175.
 » Kurzschlußanker für Elektromotoren 358, 409.
 » Erfindung der Verkettung der Mehrphasenströme 372.
 » Einphasenmotoren 433.
 » Phasenmeter 503.
 » Phasenregler 355, 571.
 Dochtkohle für Wechselstrom 91.
 Doppelgeneratoren 598.
 Drehfeld, Entstehung dess. 357, 370.
 Drehfeldzähler 536.
 » Theorie dess. 536.
 Drehrichtung der Vektoren 8. Anm.
 Drehstrom, Spannung und Stromstärke bei Verkettung 225.
 » allgemeine Vorzüge desselben 375.
 » Leitungsquerschnitte 375.
 » Phasenmesser 508.
 Drehstrommaschinen, Ankerwicklung 175, 224.
 » Allgemeines über dieselben 220.
 » Schaltungen derselben 225.
 » Ankerkonstruktionen 234, 239.
 » der allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft 234, 237.
 » der Maschinenfabrik Oerlikon 226, 233, 242.
 » von Brown, Boveri & Cie. 218.
 » von Siemens & Halske 227.
 » von Schuckert & Co., Elektrizitäts-Akt.-Gesellschaft 246.
 » der Berliner Maschinenbau-Akt.-Gesellschaft (vorm. L. Schwartzkopf) 246.
 » Materialbeanspruchung bei neueren Maschinen 249.
 Drehstrom-Gleichstromumformer 590.
 Drehstromtransformatoren 316, 318, 325, 326, 330, 332.
 Drehstrommotoren 370.
 » deren Theorie 378.
 » Wirkungsgrad 392.
 » Anlassen 397, 411, 422.

- Drehstrommotoren, Heylands Diagramme 401.
- » als Stromerzeuger 405.
 - » Vorausberechnung derselben 392.
 - » der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft 408.
 - » der Maschinenfabrik Oerlikon 412.
 - » von Siemens & Halske 415.
 - » von Brown & Boveri 417.
 - » von Lahmeyer E.-A.-G. 419.
 - » Umsteuervorrichtungen und Anlasser 422.
 - » Regelung der Umlaufzahl 424.
- Drehstromwickelungen 175.
- Dreiphasenstrom, siehe Drehstrom.
- Dreiphasenstrom aus Zweiphasensystemen 579.
- Dreipampèremeter-Methode 40.
- Dreivoltmeter-Methode 34.
- Dreieckschaltung 222.
- Dresdener Elektrizitätswerke (vergl. Kummer & Co.)
- » Elektrizitätswerk der Bahnhöfe 573.
- Drosselspulen, als Beispiele induktiver Widerstände 40, 334.
- » Einrichtung derselben 42, 43.
 - » in Hintereinanderschaltung mit Lampen 44, 334.
 - » in Parallelschaltung mit Lampen 45, 336.
- Drexler, Bestimmung der Form der Wechselstromkurven 520.
- Dudell und Marchant, Oszillograph 516.
- Dynamomaschinen für Gleichstrom-von höherer Spannung 3.
- Dynamometer, als Spannungsmesser 461, 465.
- » als Arbeitsmesser 481.
 - » Schaltung desselben bei Wechselstrommessungen 465.
 - » Schaltung desselb. bei Drehstrommessungen 461.
- Dynamostahl, Magnetisierungskurve 102.
- Effektbogenlampen f. Wechselstrom 91.
- Effektive Arbeit eines Wechselstromes 13.
- » Spannung 12.
 - » Stromstärke 12.
 - » Stärke veränderlicher Kraftlinienfelder 13.
- Eichberg u. Winter, Regelung der Umlaufzahl der Kollektormotoren 452.
- Einphasenmotoren 432.
- » Anlaßvorrichtungen 435.
 - » Erklärung d. Wirkungsweise 442.
 - » von Oerlikon 437, 439.
- Einphasenmotoren v. Brown, Boveri & Cie 438.
- » » v. Heyland 441.
- Eisen, Wattverluste in demselben 118.
- » Hysteresisverluste 118, 272.
 - » Abhängigkeit d. Permeabilität von d. magnetischen Induktion 82, 108.
 - » Magnetisierungskurven 102.
- Eisenblech, Magnetisierungskurve 102.
- Eisenhörner (Polhörner) der Induktormaschinen 217.
- Elektrizitäts-Aktien-Gesellschaft vorm. Schuckert & Co. (siehe Schuckert).
- Elektrodynamometer zur Spannungsmessung 461.
- Elektrolyse durch Wechselströme 79.
- Elektrolytischer Kondensator 81, 608.
- Elektromagnete im Wechselstrombetrieb 101.
- Elektrometer 461.
- Entladestrom eines Kondensators 48, 51.
- Ermann, Unipolare Leitung 79.
- Erregung, Einfluß derselben auf die Klemmenspannung 248, 353.
- Ewing, Verluste durch Hysteresis 107 Anm.
- » Einfluß der Blechstärke auf die Magnetisierung 119.
 - » Verluste durch Wirbelströme im Eisen 107, 118.
 - » Einfluß der Blechstärken 117.
- Felddreieck bei Asynchronmotoren 400.
- Feldmagnetismus und Ankerrückwirkung 126.
- Feldmann, Theorie des Leblanc-Umformers 601 Anm.
- » Theorie der Asynchrongeneratoren 407.
- Ferranti, Wechselstrommaschinen 201.
- » Sicherheitsvorrichtungen b. Transformatoren 340.
- Ferrantisches Phänomen 69.
- Ferraris, Erfindung der Mehrphasenmotoren 366, 437.
- » Verteilungssysteme für Wechselströme 585.
 - » Verschiebungstransformator 585.
 - » Prinzip f. Meßinstrumente 535, 545.
- Fischinger, Wechselstrommaschine 183.
- » Zweiphasenmaschine 252.
 - » Zweiphasenmotor 368.
- Flammenbogenlampen 94.
- Fleming, Transformatoridiagramm 266.
- Fluß Eisen, Magnetisierungskurve desselben 102.
- Föppl, Pendeln von Wechselstrommaschinen 570 Anm.

- Form der Wechselstromkurven 126, 511.
 Formfaktor 13.
 Fortschreitende Wickelung 176.
 Franke, Kurvenindikator 523.
 Frequenz des Wechselstromes 1.
 » Messung ders. 526.
 Friese, Wechselstrom von Gleichstrom-
 maschinen 189.
 Frölich, O., Bestimmung der Form der
 Wechselstromkurven 513.
- Ganz & Co., Versuche über unipolare
 Leitung 96.
 » Wechselstrommaschine 196.
 » Transformatoren 260.
 » Hacklbogenlampe 98.
- Gaulard u. Gibbs, Transformatoren 259.
 Gefährlichkeit der Wechselströme 3.
 Gemischte Maschinen 159.
 Geschlossene Schaltung 222, 361, 372.
 Gleichpolmaschinen 134, 211.
 Gleichrichter für Wechselstrom 80, 587,
 601.
 Gleichstrommaschinen, Gebrauch ders.
 als Wechselstrommaschinen 178, 187,
 592.
 Gleichstrom-Drehstromumwandler 592.
 Gleichung der Wellenform 129.
 Glühlampen im Wechselstrombetrieb
 45, 84, 336.
 Görges, Vorzüge des Drehstromsystems
 375.
 » Drehstrommotoren mit vermin-
 dertter Umlaufzahl 415.
 » Schaltung für Phasenverschie-
 bung 538.
 » Erfindung der Kollektormotoren
 456 Anm.
 » Drehstromanker mit Gegenschal-
 tung 415.
 » Spannungssicherungen 340 Anm.
 » Untersuchung über Wechselstrom-
 bogenlicht 89.
 » Pendeln von Wechselstrommaschi-
 nen 570 Anm.
- Graetz, Gebrauch von Aluminiumzellen
 z. Gleichrichten v. Wechselstrom 80.
 Gramme, Wechselstrommaschine 183.
 Graphische Darstellungen periodisch
 veränderlicher Größen 7.
 Graphische Darstellung des Wechsel-
 stromes 2.
 Grisson, Gleichrichter 607.
 » Gleichstrom - Wechselstrom-
 umformer 609.
 » Aluminiumzellen als Kondens-
 atoren 608.
 Gußeisen, Magnetisierungskurve 102.
- Hacklbogenlampe 98.
 Harmonisch veränderliche Größen 8.
 Hartmann & Braun, Wechselstromzähler
 536.
 » Phasemesser 507.
 » Frequenzmesser 526.
 Hartmann-Kempff, Messung der Perio-
 denzahl 526.
 » Messung der Schlüpfung 529.
 Haselwander, Verketung der Mehr-
 phasenströme 372.
 Helios, Drosselspulen 43.
 » Bogenlampen 86.
 » große Wechselstrommaschine 196.
 » Transformatoren 319.
 » Umformer 600.
- Henry, Einheit der Selbstinduktion 30.
 Heubach, Untersuchungen über Wechsel-
 strom-Bogenlicht 88.
 » Vorausbestimmung v. Drehstrom-
 motoren 393.
- Heyland, Diagramm des Drehstrom-
 motors 398, 401.
 » Einphasenmotor 440.
 » Motorgeneratoren 456.
 » Kompensierung und Kompound-
 ierung von Motorgeneratoren
 456.
- Heaviside, Einführung des Wortes Im-
 pedanz 26.
 Hewitt, Quecksilberlampen 605.
 Hilfsphase 365, 435.
 Hintereinanderschaltung induktiver
 Widerstände 32.
 » von Kapazität, Selbstinduktion
 und Widerstand 55.
 » von Drosselspulen u. Lampen 34.
 » von Transformatoren 341.
- Hitzdrahtmeßinstrumente 471.
 Houston, Bestimmung der Kurvenform
 der Wechselströme 130.
 Hummel, Methode der Phasenverschie-
 bung 541.
 » Zähler für Wechselstrom 536.
- Hutin u. Le Blanc, Kondensatoren 163.
 » Dämpfer 569.
- Hysteresis 105.
 » Wattverlust durch dieselbe in ver-
 schiedenen Materialien 107, 118,
 272.
- Impedanz 26.
 » parallel geschalteter Widerstände
 mit Selbstinduktion 36.
 » durch Kapazität 54.
 » in komplexer Darstellung 76, 77.
- Induktanz 26.
 Induktion, gegenseitige 31.

- Induktiver Widerstand 26.
 Induktion im Anker der Wechselstrommaschinen 152.
 Induktormaschinen 207.
 » von Kingdon 207.
 » der Maschinenfabrik Oerlikon 210, 213.
 » System Thury 209.
 » der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft 217.
 » von Brown, Boveri & Cie. 219.
- Jamin u. Maneuvrieu, Unipolare Leitfähigkeit des Lichtbogens 94.
 Joubert, Bestimmung der Form der Wechselstromkurven 512.
- Käfiganker 358.
 Kapazität im Wechselstromkreise 47.
 » in Hintereinanderschaltung mit Widerstand 52.
 » in Hintereinanderschaltung mit Selbstinduktion 55.
 » Parallelschaltung mit Selbstinduktion und Widerstand 65.
 » Gebrauch derselben zur Erzeugung einer Kunstphase 344, 366.
 » Reaktanz einer 42, 54.
 » im Nebenschluß 64, 65.
 » ohmscher und induktiver Widerstand verteilt längs einer Leitung 69.
 » in komplexer Darstellung 77.
- Kapp, Koeffizienten für den Einfluß der Pol-, Spulen-, Zwischenraumbreite bei Wechselstrommaschinen 155.
 » Formel für die Polflächen von Wechselstrommaschinen 170.
 » Wechselstrommaschine 180.
 » Einteilung d. Transformatoren 287.
 » Pendeln von Wechselstrommaschinen 570 (Anm.).
 » Transformatorendiagramm 266, 310.
 » Vorausbestimmung d. Spannungsabfalles b. Transformatoren 303.
 » Bestimmung der Streuung von Transformatoren 304, 307, 308.
 » Sicherheitsvorrichtung an Transformatoren 339.
- Kaskadenschaltung 430.
 Kelvinsches Phänomen 120.
 Kempe, Messung des Selbstinduktionskoeffizienten 533.
 Kennely, Bestimm. d. Kurvenform 130.
 Kerntransformator 298, 315.
- Kingdon, Wechselstrommaschine 207.
 Klaasen, Verluste durch Hysteresis 107.
 Klimenko, Erfinder der Induktormaschinen 207.
 Kompensierung wattloser Ströme 444, 451.
 Koch, Gleichrichter 604.
 Kolben, E., Diagramme für Wattverluste im Eisen 107, 108, 118.
 » Vorausberechnung der Drehstrommotoren 392.
- Kollektor als Frequenzwandler 448.
 Kollektormotoren 446.
 » Regelung d. Umdrehungszahl 451.
 » Kreisdiagramm 452.
- Komplexe Größen, ein Darstellungsmittel f. Wechselstromerscheinungen 73.
- Kondensanz 52.
 Kondensatoren im Wechselstromkreise 47, 162.
 » Begriff u. Veranschaulichung 50.
 » Einrichtung derselben 163, 345, 365, 608.
 » elektrolytische 81, 366, 608.
- Konduktanz 77.
 Konduktionsmotoren 446.
 Konverter 588.
- Körting & Matthiesen, Wechselstromlampe 92, 125.
- Kraftlinienzahl, effektiver Mittelwert 13.
 » Veränderung ders. und ihr Einfluß 21.
- Kreisdiagramm, Heylandsches 398, 401.
 » des Kollektormotors 452.
- Krupp, Dynamostahl 108.
 Kunstphase 344, 366.
- Kupferverluste im Transformator 274.
 Kummer & Co., Zweiphasenmaschine 252.
 » Zweiphasenmotor 368.
 » Wechselstrommaschine 183.
- Kurvenform der Wechselströme 127.
 » Bestimmung der Gleichung 129.
 » Einfluß auf die Wirkungen 129.
 » Messung derselben 511.
 » Bestimmung nach Behn-Eschenburg 520.
 » Bestimmung nach Drexler 520.
 » » nach Frölich 513.
 » » nach Weinhold 517.
 » » nach Franke, 523.
 » » mit dem Oszillographen 515.
 » Einfluß auf die Angaben der Spannungszeiger 472.
 » Einfluß auf die Angaben der Stromzeiger 477.
 » Einfluß auf die Wirkungen 128.
- Kurzschlußvorrichtung für Anker von Asynchronmotoren 421.

Kurzschlußstrom bei Transformatoren 310.

Kurzschluß einer Wechselstrommaschine 35, 164.

Kurzschlußanker 358.

Ladestrom eines Kondensators 48, 51.

La Cour, Polyzyklisches System 580.

Lahmeyer, E.-A.-G. Transformator 326.

» Anlaßvorrichtung für Drehstrommotoren 424.

» Drehstrommotoren 418.

» Bürstenabhebevorrichtung 421.

» Anlasser f. Drehstrommotoren 424.

» Meßschaltungen für hohe Spannungen 473.

» Rotierende Umformer 590.

Lampe Soleil 92.

Lasche, Neuerungen an Wechselstrommaschinen 237 (Anm.).

Läufer 358, 395, 420.

Leblanc und Hutin, Dämpfer 570.

» Umwandler 600.

» Kondensatoren 163.

Leerlaufstrom bei Wechselstrommagneten 111.

» bei Wechselstrommaschinen 248.

» bei Transformatoren 283.

» bei Asynchronmotoren 442.

» bei Drehstrommotoren 390, 428.

Leistungsfaktor 17, 112.

» der Drehstrommotoren 394.

» der Transformatoren 277.

Leitungsquerschnitte bei Wechselstrom, Zweiphasenstrom u. Drehstrom 376.

Lichtentwicklung des Wechselstrom-Bogenlichtes 89.

Lochanker 171.

Luftzwischenraum 393.

Magnetisches Feld u. Selbstinduktion 28.
Magnetische Wirkung der Wechselströme 101.

Magnetische Felder sekundärer Art bei Motoren 399.

Magnetisches Drehfeld durch Zweiphasenströme 357.

Magnetische Kreisprozesse bei Wechselstrom 105.

Magnetische Streuung, siehe Streuung 307, 386, 399.

Magnetisierungskurven 101.

Magnetisierungsstrom 111.

Manteltransformatoren 288, 291, 296, 327, 329, 332.

Maximalwerte veränderlicher Größen 11.
Maschinenfabrik Oerlikon (s. Oerlikon)

Mehrphasenstrom (vergl. Drehstrom)
Mehrphasenstrom, von Gleichstrommaschinen erzeugt 179, 187, 596.

Mehrphasenmaschinen, allgemeines über dieselben 220.

Meßinstrumente mit Elektromagneten 113.

Messungen an Wechselströmen und Wechselstromapparaten 461, 475, 481, 535.

» der Spannung 461,

» der Stromstärke 475.

» der Wechselstromarbeit 481.

» der Drehstromarbeit 496, 542.

» der Wechselzahl 526.

» der Selbstinduktion 532.

» der Phasendifferenz 503.

» der Frequenz 526.

» der Schlüpfung 528.

Mittelwerte veränderlicher Größen 11.
» effektive 12.

Momentanwerte veränderlicher Größen 12.

Monozyklisches System 574.

Mordeys Anordnung bei Wechselstrommaschinen 155, 205.

» Wechselstrommaschine 205.

Motoren, synchrone Wechselstrommotoren 342.

» asynchrone Wechselstrommotoren 432, 445.

» Drehstrommotoren 370.

» mit Kollektor 446.

» Zweiphasenmotoren 356.

Motorgeneratoren 588.

» asynchrone 456.

Niagarakraftanlage 253.

Nullpunkt der Verkettung von Mehrphasenströmen 222, 372.

Nutenanker 171.

Nutenformen 172.

Oeltransformatoren 326, 328.

Oerlikon, Maschinenfabrik, Induktormaschinen 210, 213.

» Drehstromerzeuger 226, 232.

» neuer, besonders großer Stromerzeuger 233.

» ältere Drehstrommaschinen 242.

» Wechselstromtransformatoren 320.

» Drehstromtransformatoren 321.

» Asynchronmotoren 411, 425, 437.

» Anlaßvorrichtung für Asynchronmotoren 411, 426, 437.

» Regelung der Umlaufzahl bei Drehstrommotoren 424.

Oerlikon, Stufenmotoren 425.
» Phasenancker 359.
» Drehstrommotoren 411, 425.
Oszillograph 515.
Parallelschaltung von Widerständen mit Selbstinduktion 36.
» von Selbstinduktion u. Kapazität 64.
» von Selbstinduktion, Kapazität u. Widerstand 60.
» von Lampen mit Drosselspulen 45.
» von Transformatoren 259.
» von Wechselstrommaschinen 554.
» von Drehstrommaschinen 563.
Pendeln d. Wechselstrommaschinen 567.
» Mittel zur Verhütung dess. 569.
Periode des Wechselstromes 1, 23, 326.
Periodenzahl, Messung derselben 526.
» Einfluß derselben auf die Polzahl der Motoren 393.
Permeabilität des Eisens 108.
» Abhängigkeit von d. Induktion 119.
» Einfluß bei Transformatoren 266.
Phase des Wechselstromes 3.
Phasenancker 359.
Phasendifferenz 3, 7, 23.
» bei Vektordiagrammen 9.
» Einfluß auf die effektive Arbeit eines Wechselstromes 17.
» bei Selbstinduktion 27.
» parallelgeschalteter Maschinen 556.
» bei Kapazität 54.
» bei Kompensation durch Kondensatoren 64.
» bei Wechselstrombogenlicht 86.
» bei Transformatoren 263.
» Messung derselben 504, 508.
Phasenmeter 504, 507, 508.
» von Dobrowolski 503.
» » Hartmann & Braun 507.
» » Punga 508.
Phasenmessung 501, 503.
Phasenspannung bei Zweiphasensystemen 361.
» bei Dreiphasenströmen 225.
Phasenlampe 562, 564.
Phasenunterschied 9.
Phasenvergleich 562, 565, 567.
Phasenregler 355, 570.
Phasenverschiebung um 90° 538.
» durch Wechselstrom-Bogenlicht 86.
Phasenverschiebungstransformator 585.
Phasenverzögerung 7.
Phasenvoreilung 7.
Polbreite, Einfluß auf die Induktion im Anker 155.
Pollak, Gleichrichter für Wechselströme 601.

Polzahl der Motoren 393.
Polyzyklisches System 577, 579.
Präzisionsspannungsmesser 465, 468.
Präzisionsstrommesser 477, 478.
Präzisionsarbeitsmesser 493,
Präzisionszähler 544.
Praktische Bedeutung des Wechselstromes 3.
Punga, Phasensmesser f. Drehstrom 508.

Quadrantelektrometer zur Messung von Wechselstromspannungen 462.
Quadratur, Strom und Spannung in 19.

Reaktanz 26.
» eines Kondensators 52.
» resultierende 55.
Reaktions- oder Repulsionsmotoren 433, 446.
Resonanzeffekt 57.
Rheinfelden, Kraftübertragungswerke der A. E.-G. daselbst 230.
Ringankermaschinen 180.
Ringschaltung 372.
Roefler, Einfluß der Kurvenform auf Bogenlicht 89.
» Erklärung der Asynchronmotoren 433 (Anm.).
Rosenberg, Pendeln von Wechselstrommaschinen 570 (Anm.).
Rotierende Umformer 588.
Rotor, siehe Läufer.
Rückwirkung des Ankers auf das Magnetfeld 556.

Scheibenanker 202, 204.
Schaltungen bei Mehrphasenmaschinen 373.
Scheitelfaktor 13.
Schleichende Spulenwicklung 176.
Schleifringe am Anker der Drehstrommotoren 397, 411.
Schleifenwicklung 177, 235.
Schlüpfung 387, 406.
» Messung ders. 528.
Schmiedeeisen, Magnetisierungskurve 102.
Schuckert & Co., Drosselspule 43.
» Drehstrommaschine 246.
» Wechselstromtransformatoren 329.
» Drehstromtransformatoren 330.
» Wechselstromzähler 552.
Schwartzkopf, Drehstrommaschine 245.
» Transformatoren 331.
Scott, Umwandlung eines Zweiphasen- in ein Dreiphasensystem 578.

- Scott, Schaltung d. Transformatoren 579.
 » Schaltung einer Heliosmaschine 199.
- Seefehlner, Kurvenzeichner 517 (Anm.).
 Selbsterregende Wechselstrommaschine 110, 135, 456.
- Selbstinduktion, Begriff ders. 21.
 Selbstinduktionskoeffizient 25, 29, 30, 327.
 » Messung dess. 532.
- Selbstinduktion u. Ankerrückwirkung bei Wechselstrommaschinen 155.
- Selbstinduktion in einem Wechselstromkreise 20.
 » in Hintereinanderschaltung 32.
 » in Parallelschaltung mit Selbstinduktion 36.
 » in Parallelschaltung mit Kapazität 60.
 » und Kapazität längs einer Leitung verteilt 69.
 » des Ankers einer Wechselstrommaschine 160.
- Sicherheitsvorrichtungen an Transformatoren 339.
- Siemens & Halske, Ankerwickelungen 141.
 » Anlassvorrichtung für Drehstrommotoren 422.
 » ältere Wechselstrommaschine 200.
 » Wechselstrommaschine Mod. R 193.
 » neuere Konstruktionen großer Maschinen 240.
 » Drehstrommaschine 227.
 » Wechselstromtransformatoren 315.
 » Drehstromtransformatoren 315.
 » Drehstrommotoren 415.
 » Drosselspule 42.
 » Sicherheitsvorrichtungen an Transformatoren 340.
 » Spannungssicherungen 341.
 » Drehstromanker mit Gegenschaltung 415.
 » astatisches Elektrodynamometer 462.
 » Messung der Arbeit von Wechsel- u. Drehstrom 544.
 » Bestimmung der Kurvenform 514.
 » Spannungsmesser 467, 469, 546.
 » Strommesser 475, 477, 546.
 » Arbeitsmesser 481, 486, 546.
 » Drehfeldmagnete 452.
 » Parallelschaltung von Wechselstrommaschinen 560.
 » Ulbrichts System 571.
 » Verstellvorrichtung der Centrifugalregulatoren 560.
 » Neuerung an Flammenbogenlampen 94 (Anm.)
- Siemens & Halske, Umsteuerapparat für Drehstrommotoren 422.
 » Zähler 544.
- Siemens-Schuckertwerke, Schmiede-eiserne Konstruktionen an Wechselstrommaschinen 240.
 » Transformatoren d. Manteltype 332.
- Sinuslinie oder Sinoide 2.
 Skineffekt 120.
 Soleillampe 92.
- Spulenbreite gleich der Polbreite 135.
 » kleiner als die Polbreite 135, 144.
 » größer als die Polbreite 137, 144.
- Spulenwicklung 172.
- Spannung, effektive 13.
- Spannungsabfall in Wechselstrommaschinen 159, 163.
 » bei Transformatoren 308, 310.
- Spannung bei verketteten Mehrphasenströmen 225.
- Spannungsmessungen bei Wechselstrom 464.
- Spannungsmesser von Weston 466.
 » von Siemens & Halske 467, 470.
 » der A. E.-G. 468, 471.
- Spannungssicherungen 340.
- Spulenfaktor bei Wechselstrommaschinen 150.
 » bei Induktormaschinen 155, 211.
- Stabilität der Motoren 455.
- Ständer 392, 410.
- Stanley, Wechselstrommaschine 191.
 » Kondensatoren 163.
 » Transformatoren 327.
- Stator, siehe Ständer 392, 410.
- Steinmetz, Ch. T., Darstellung der Wechselstromerscheinungen durch komplexe Größen 74.
 » Umformer 596 (Anm.)
 » Hysteresisformeln 107.
 » Wirbelstromformeln 118, 272.
 » Verzerrung der Stromkurven bei Transformatoren 280.
 » Mono- und Polyzyklisches System 571, 574, 577.
- Sternschaltung 222, 372.
- Streuung bei Transformatoren 302.
 » bei Elektromotoren 386.
- Stromdreieck b. Asynchronmotoren 400.
- Stromkurven, Form- u. Scheitelfaktor bei denselben 14.
 » Verzerrung b. Transformatoren 280.
 » Aufnahme ders. 511.
 » Gleichung ders. 126.
- Stöckhardt, Frequenzmesser 526.
- Stromstärke, Momentanwerte 12.
 » Maximalwerte 12.
 » Mittelwerte 11.
- Stromzeiger 475, 546.

Stromzeiger, Präzisionsstrommesser 477, 478.
Stromtransformatoren 479, 547.
Stromwandler 479, 547.
Stromstärke, effektive 13.
» Messung derselben 475.
» bei verketteten Mehrphasenströmen 225.
Stromwage von W. Thomson 303.
Stufenanker 410.
Stufenmotoren 424,
Summation der Wechselströme 5.
» durch Vektordiagramme 8, 9.
» mehrerer gleichartiger, veränderlicher Größen 10.
Superposition von Wechselströmen 7.
Suszeptanz 77.
Swinburne, Phasenregler 355, 571.
» Kondensatoren 163.
Synchrone Wechselstrommotoren 342.
» deren Anlassen mit Hilfsphase 345.
» Wirkungsweise 345.
» Leistung 349.
» Gebrauch des Phasenreglers 355.
» Drehstrommotoren 349.
Synchronmotor als Stromerzeuger 353.
» Einfluß der Erregung 353.
» Haupteigenschaften 355.

Teilung 172.
Tesla, Erfindung der Mehrphasenmotoren 359.
» Zweiphasensystem mit drei Leitungen 361.
Thomson, Elihu, Wechselstrommotor 427.
» Abstoßende Wirkungen von Wechselströmen 128.
Thomson, W. (Lord Kelvin), Arbeitszeiger 488.
» Verteilung des Wechselstromes in massiven Leitern 123.
Thury, System von Induktormaschinen 209.
Tobler, Messung der Selbstinduktion 534.
Tourenregelung bei Drehstrommotoren 424, 415.
Transformatoren, Begriff derselben 257.
» Geschichtliches über dieselben 259.
» Theorie derselben 260.
» Einfluß der Permeabilität 266.
» Graphische Darstellung der Vorgänge in denselben 265.
» Einfluß der Streuung 269.
» Kerntransformatoren 287, 298, 315.
» Manteltransformatoren 327, 329, 332.
» Verluste im Eisen 271.

Transformatoren, Verluste i. Kupfer 274.
» Gesamtverlust 275.
» Wirkungsgrad 275.
» Vorausberechnung des Wirkungsgrades 278.
» Jahreswirkungsgrad 277.
» Leerlaufstrom 283.
» Leistungsfaktor 275.
» Einrichtung derselben 314.
» Arbeitsverhältnisse derselben 301, 305.
» Vorausberechnung derselben 287, 289.
» Vorausberechnung des Spannungsabfalles 303.
» Verzerrung der Stromkurve 280.
» Beschreibung ausgeführter Transformatoren 314.
» von Siemens und Halske 315, 332.
» von Schuckert & Co., 329, 332.
» der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft 318, 327.
» von Helios 319.
» der Maschinenfabrik Oerlikon 321.
» der Westinghouse Company 327.
» von Brown, Boveri & Cie. 322.
» von Lahmeyer, E. A. G. 325.
» von Schwartzkopf 330.
» mit offenem magnetischen Kreis 333.
» Abzweigtransformatoren 337.
» Sicherheitsvorrichtungen an denselben 339.
» Scotts Schaltung 578.
» zur Phasenverschiebung nach Ferraris und Arnò 585.
Trommelanker 190, 191.

Ulbricht, System der Verteilung von Wechsel- und Drehstrom 572.
Umsetzungsverhältnis der Transformatoren 256.
Überlastungsfähigkeit der Motoren 455.
Umformer 588.
Umsteuervorrichtungen für asynchrone Motoren 409, 421, 454.
Umwandler, rotierende 590.
Union, Wechselstromzähler 550.
» Drehstromzähler 551.
Unipolare Elektrizitätsleitung 79.
Unipolare Leitfähigkeit des Lichtbogens 94.
Utzinger, Regelung von Wechselstrombogenlampen 125.

Vektoren, Begriff 7.
» Winkelgeschwindigkeit ders. 8.

Vektordiagramm des einfachen Wechselstromes 9.

- » verwendet zur Summation von Wechselströmen 8, 9.
- » zur Zusammensetzung von Widerstand, Kapazität und Selbstinduktion 32, 36, 62.
- » für Transformatoren 263, 306, 311.
- » für Motoren 404, 453.

Verkettete Spannung und Stromstärke bei Zweiphasensystemen 360.

Verkettung bei Dreiphasenstrom 225, 372.

- » bei Zweiphasenstrom 359.

Verstellvorrichtung für Centrifugalregulatoren 560.

Verluste im Eisen durch Hysteresis 118, 272.

- » im Kupfer 274.
- » durch Wirbelströme 118, 272.
- » Einfluß der Blechstärke 117.

Verschiebungsstrom 52.

Verschiebungstransformator 385.

Verteilung der Wechselströme 572.

- » nach Ulbricht 572.
- » nach Scott 578.
- » nach Steinmetz 577.
- » nach Arnold-Bragstadt-La Cour 581.
- » nach Ferraris und Arnò 585.

Verzögernder Widerstand 26.

Voltmeter für Wechselströme 469, 472.

Vorausberechnung von Wechselstrommaschinen 164.

- » von Transformatoren 289, 298.
- » von Motoren 392.

Wärmewirkung der Wechselströme 83.

Wattloser Strom, Begriff desselben 19, 28, 68, 110.

- » bei Wechselstromelektromagneten 110.

Wattloser Strom, Kompensation desselben 456, 449, 407.

- » Messung desselben 509.

Wattmeter von Siemens & Halske 481, 486.

- » von W. Thomson 488.
- » der A. E. G. 489, 494.
- » von Weston 492.

Wattstrom 110, 505.

Wechselpolmaschine 134, 211.

Wechselspannung, Messung ders. 461.

Wechselstrombogenlampen 95, 97, 99, 124, 125.

Wechselstrombogenlicht 84.

Wechselstrom, Bedenken gegen seine Anwendung 4.

- » Arbeitsleistung desselben 162.

Wechselstrom, Kurvenformen der Praxis 127.

- » Verteilung in massiven Leitern 120.
- » Abstoßende Wirkungen 123.
- » Darstellung durch komplexe Größen 74.
- » Elektromagnete 109, 113.
- » Wesen desselben 1.
- » graphische Darstellung 2.
- » praktische Bedeutung 3.

Wechselströme, Gefährlichkeit derselben 4.

- » Ungeeignetheit für chemische Prozesse 4, 79.
- » Summation derselben, 5, 10.
- » von Gleichstrommaschinen 179.

Wechselstrommaschinen, Einteilung mit Fremderregung 133, 135.

- » Geschichtliches über dieselben 132.
- » mit Ringanker 180.
- » » Trommelanker 189.
- » » Scheibenanker 202.
- » mit Selbsterregung 135, 159.
- » Kurzschluß derselben 35.
- » Einfluß der Spulen- und Polbreite 135.

- » Theorie derselben 146, 167.

- » Vergleich mit Gleichstrommaschine 148.

- » Kapps Koeffizienten 151.

- » Gang der Berechnung derselben 167.

- » Ankerwicklung 170.

- » Vorausbestimmung des Spannungsabfalles derselben 164.

- » von Kapp 180.

- » von Kummer & Co. (Fischinger) 183.

- » von Blackey-Emmott 189.

- » der Westinghouse-Co. 191.

- » von Siemens & Halske, neuere Form, Mod. R. 193.

- » von Siemens & Halske, ältere Form 200.

- » von Helios 196.

- » neuere Konstruktionen aus Schmiedeeisen 237, 240.

Wechselstrommaschine,

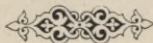
- » von Brown, Boveri & Cie. 194.
- » von Ferranti, ältere Form 201.
- » von Ferranti, neuere Form, 203.
- » von Mordey 205.
- » von Kingdon 207.
- » Induktormaschinen 207.
- » für Mehrphasenströme 217, 236.
- » neuere Konstruktionen 237, 240.

Wechselstrommotoren, synchrone 342.

- » asynchrone 432.

Wechselstrom, Verteilungssysteme 372.

- Wechselstromzähler 535.
 Wedding, Einfluß der Kurvenform auf Bogenlicht 89.
 » Lichtaussendung d. Bogenlichts 93.
 Wehnelt, Einfacher Oszillograph 517.
 Weinhold, Kurvenzeichner 517.
 Wellen von anderer als sinoidaler Form 126.
 Wellenwicklung bei Wechselstrom-ankern 177.
 » für Drehstrom 211.
 Wenström, Verkettung der Phasenströme 372.
 Westinghouse, Wechselstrommaschine 191.
 » Transformator 327.
 » Zweiphasenmaschinen 253.
 » Umformer 594.
 Wickelung, fortschreitende 176.
 » Wellenwicklung 177, 220.
 » Scheibenwicklung 177.
 » Stabwicklung 178.
 » für Mehrphasenströme 178.
 » schleichende Stabwicklung 178.
 Widerstand, Selbstinduktion und Kapazität in Hintereinanderschaltung 55.
 » Ohmscher 26.
 » induktiver 26.
 » verzögernder 26.
 Winkel des Phasenunterschiedes 25.
 Winkelgeschwindigkeit der Vektoren 8.
 Winter und Eichberg, Regelung der Umlaufzahl der Kollektormotoren 452.
 Wirbelströme 115.
 » Arbeitsverluste durch dieselben 118.
 Wirbelströme, Einfluß der Blechstärke bei Eisen 117.
 » Einfluß auf die Magnetisierung 119.
 » bei Transformatoren 272.
 Wirbelstrombremse 560.
 Wirkungsgrad der Transformatoren 275, 278.
 Wirkungsgrad der Drehstrommotoren 392.
 Wüst & Cie., Stufenmotoren 429.
 Zähler für Wechsel- und Drehstrom 535.
 Zahnbreite, Einfluß derselben bei Wechselstrommaschinen 149, 211.
 Zentrifugalregulatoren für Wechselstrombetrieb 560.
 Zipernowsky, Parallelschaltung der Transformatoren 260.
 Zweiphasenmaschinen 223, 250.
 » von Brown, Boveri & Cie. 251.
 » der Aktien-Gesellschaft Dresdener Elektrizitätswerke (vorm. Kummer & Co.) 252.
 » der Arbeitsverteilung am Niagara 254.
 Zusammensetzung gleichartiger veränderlicher Größen 9.
 Zuschalten einer Maschine zu parallel laufenden 558.
 Zweiphasenströme, Verkettung derselben 359, 361.
 Zweiphasensystem 359, 375.
 » mit drei Leitungen 361, 376.
 Zweiphasenmaschine 250.
 » von Brown, Boveri & Cie. 251
 » der Dresdner Elekt. Werke (vorm. Kummer & Co.) 252.
 » der Niagara-Anlage 253.
 Zweiphasenmotoren 356.
 » von Brown, Boveri & Cie. 367.
 » der Aktien-Gesellschaft Dresdener Elektrizitätswerke vorm. Kummer & Co. (Fischinger) 368.
 » Wirkungsweise 361.
 » Eigenschaften 364.
 » Schaltung 365.
 Zweiphasenstrom, Umsetzung in Dreiphasenstrom nach Scott 578.
 » Umsetzung nach Ferraris-Arnò 585.
 » Leistungsmessung bei 501.

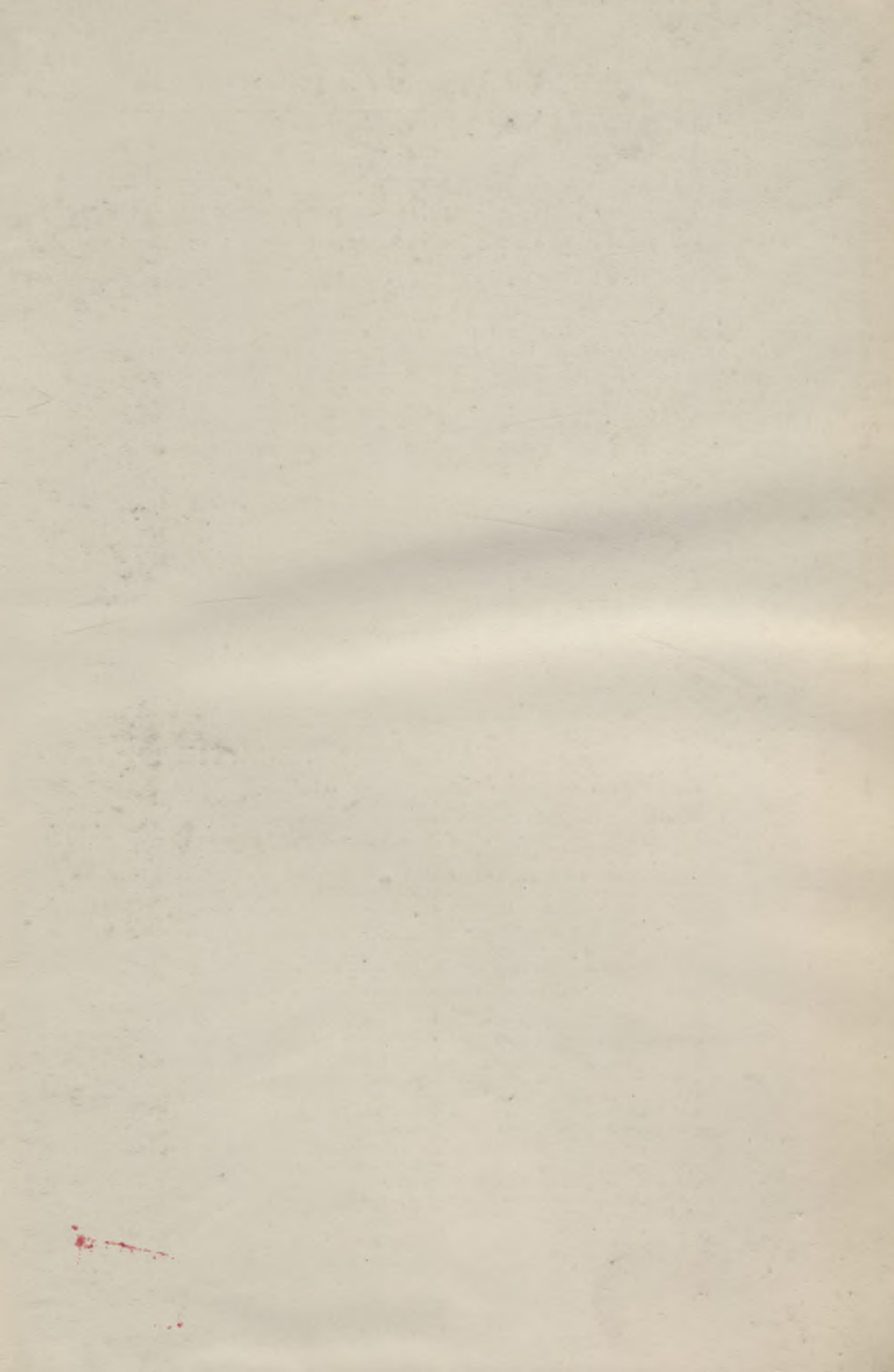


- Averdieck, Ing. W.** Die Installation unter Berücksichtigung des »System Bergmann«. Ein Leitfaden für Monteure und alle diejenigen, welche die Herstellung von Lichtanlagen zu veranlassen haben. gr. 8°. 54 Seiten. Mit 88 Abbildungen und 1 Tafel. Brosch. *M* 2.—.
- Biscan, Prof. Wilh.** Die Bogenlampe. Physikalische Gesetze. Funktion, Bau und Konstruktion derselben für Mechaniker, Installateure, Maschinenschlosser, Monteure etc., sowie als Anleitung zur Anfertigung von Bogenlampen. gr. 8°. 86 Seiten. Mit 74 Abbildungen. Brosch. *M* 2.—, geb. *M* 2.50.
- Biscan, Prof. Wilh.** Die Dynamomaschine. Zum Selbststudium für Mechaniker, Installateure, Maschinenschlosser, Monteure u. s. w., sowie als Anleitung zur Selbstanfertigung von Dynamomaschinen leicht fäglich dargestellt. Neunte, vermehrte Aufl. gr. 8°. 126 S. Mit 110 Abb. Brosch. *M* 2.—, geb. *M* 2.75.
- Biscan, Prof. Wilh.** Die elektrischen Messinstrumente. Die wissenschaftlichen Messinstrumente und Messbehelfe. gr. 8°. 102 Seiten. Mit 98 Abbildungen. Brosch. *M* 3.—, geb. *M* 3.75.
- Biscan, Prof. Wilh.** Der Wechselstrom und die Wechselstrommaschinen. Zum Selbststudium für Mechaniker, Installateure, Maschinenschlosser, Monteure etc. leicht fäglich dargestellt. gr. 8°. 104 Seiten. Mit 90 Abbild. Brosch. *M* 2.50, geb. *M* 3.—.
- Biscan, Prof. Wilh.** Formeln und Tabellen für den praktischen Elektrotechniker. Ein Hilfs- und Notizbuch. Fünfte Auflage. kl. 8°. 176 Seiten. Mit Abbild. und 4 Tafeln. Geb. *M* 2.—.
- Bohnenstengel, C.** Die Elektrizität auf Dampfschiffen. Ein Leitfaden für Ingenieure und Maschinisten. Zweite Auflage. gr. 8°. 76 Seiten. Mit 116 Abbildungen. Geb. *M* 2.—.
- Brauchbar, Dr. Rud.** Über Unfälle durch hochgespannte elektrische Ströme und die erste Hilfeleistung bei denselben. 8°, 16 Seiten Mit 4 Abbild. Brosch. *M* —.60.
- Braun, Ober-Ing. H.** Gewichtstabellen über Flach-, Rund- und Profilleisen für alle technischen Bureaux und Gewerbetreibende. gr. 8°. VI und 60 Seiten. Brosch. *M* 2.—.
- Dürre, Prof. Dr. Ernst Friedrich.** Ziele und Grenzen der Elektrometallurgie. Eine vergleichende Betrachtung der heutigen Hüttenprozesse und der bis jetzt geschehenen und überhaupt möglichen Anwendungen der Elektrizität bei der praktischen Metallgewinnung. Für praktische Hüttenleute und Elektrotechniker. 15 Bog. gr. Lex. 8. Mit 44 Textfig. und 21 farbigen Tafeln. Brosch. *M* 20.—, geb. *M* 22.—.
- Elektrotechnikers literarisches Auskunftsbuch.** Die Literatur der Elektrotechnik, Elektrizität, Elektrochemie, Elektrometallurgie, des Magnetismus, der Telegraphie, Telephonie, Blitzschutzvorrichtung, Röntgenstrahlen, sowie der Acetylen- und Carbidindustrie der Jahre 1884 bis 1903. Mit Schlagwortregister. Zusammengestellt von Fr. Schmidt-Hennigker. 7. ergänzte Auflage. 8°. 156 S. Brosch. *M* 1.25.
- Feldmann, Ingen. Clarence P.** Wirkungsweise, Prüfung und Berechnung der Wechselstrom-Transformatoren. Für die Praxis bearbeitet. gr. 8°. 514 Seiten. Mit 279 Abbildungen. Brosch. *M* 12.—, geb. *M* 13.—.
- Haas, Prof. Dr.** Einführung in die Elektrizitätslehre. Zwölf gemeinverständliche Vorträge. 8°. 101 Seiten. Mit 78 Abbildungen. Brosch. *M* 1.50.
- Heim, Prof. Dr. Carl.** Akkumulatoren für stationäre elektrische Beleuchtungs-Anlagen. gr. 8°. Dritte verm. Aufl. 116 Seiten. Mit 77 Abbildungen. Brosch. *M* 3.—, geb. *M* 4.—.
- Heim, Prof. Dr. Carl.** Die Einrichtung elektrischer Beleuchtungs-Anlagen für Gleichstrombetrieb. Vierte umgearbeitete und vermehrte Auflage. gr. 8°. 672 Seiten. Mit 605 Abbildungen. Brosch. *M* 11.50, geb. *M* 12.50.

- Heinke, Prof. Dr. C.** Die Grundvorstellungen über Elektrizität und deren technische Verwendung. In Form eines Gesprächs zwischen Laie und Fachmann. Zweite verm. Auflage. gr. 8°. 80 Seiten. Mit 24 Abbildungen. Brosch. *M* 1.50.
- Herzog, Ingen. S.** Schule des Elektromonteurs. Handbuch für Elektromonteur und Maschinen elektrischer Kraft- und Lichtanlagen. 8°. 141 Seiten. Mit 136 Abbild. Geb. *M* 2.50.
- Kapp, Ingen. Gisbert.** Elektrische Wechselströme. Autorisierte deutsche Ausgabe von Hermann Kaufmann. Dritte Aufl. 8°. 92 Seiten. Mit zahlr. Figuren. Brosch. *M* 2.—, geb. *M* 2.75.
- Keil, stud. arch. nav. P.** Elektrische Schifffahrt. Darstellung ihrer Geschichte und Entwicklung nebst Anleitung zur Einrichtung elektrischer Boote. gr. 8°. 64 Seit. Mit 24 Abbild. Brosch. *M* 1.80.
- Krämer, Ober-Ingen. Jos.** Wirkungsgrade und Kosten elektrischer und mechanischer Kraft-Transmissionen. Soll bei einer Fabrik-Neuanlage mechanische oder elektrische Transmission eingerichtet werden? Ist es empfehlenswert, bestehende Transmissionen durch elektrische zu ersetzen? Welches elektrische System soll angewendet werden? 2. umgearb. und verm. Auflage. gr. 8°. 126 Seiten. Mit 82 Abbild. Brosch. *M* 4.50, geb. *M* 5.50.
- Krämer, Ober-Ingen. Jos.** Konstruktion und Berechnung für 20 verschiedene Typen von Dynamo-Gleichstrom-Maschinen für Maschinen-Ingenieure und Elektrotechniker. 2. gänzlich neu bearbeitete Aufl. Mit 25 Tafeln, wovon 9 in Farbendruck, als Zeichenvorlagen bei Konstruktionsarbeiten, erläut. Text und 49 Fig. Lex. 8°. Brosch. *M* 15.—, Kart. *M* 15.50.
- Krämer, Ober-Ingen. Jos.** Die mechanischen und elektrischen Konstruktionen für elektrische Eisenbahnen. Hilfsbuch für Maschinen-, Elektro- und Eisenbahn-Ingenieure, Konstrukteure und Wagenbauer, zugleich ein Vorlagenwerk für Konstruktions-Bureaux. Bahnmotoren und Generatoren. 33 lithographische Tafeln, wovon 10 in Farbendruck und 9 Bogen Text mit 84 Figuren. Querquart. Geb. *M* 20.—.
- Krieg, Dr. Martin.** Taschenbuch der Elektrizität. Ein Nachschlagewerk und Ratgeber für Techniker, Monteure, Industrielle u. technische Lehranstalten. Fünfte umgearbeitete Aufl. kl. 8°. 350 Seiten. Mit 295 Abbildungen. Geb. *M* 4.—.
- Krüger, E. A.** Die Herstellung der elektrischen Glühlampe. Nach in den verschiedensten Glühlampen-Fabriken gesammelten praktischen Erfahrungen gemeinverständlich erörtert. gr. 8°. 103 Seit. Mit 72 Abbild. u. 5 Taf. Brosch. *M* 3.—, geb. *M* 3.50.
- Le Blanc, Prof. Dr. Max.** Lehrbuch d. Elektrochemie. 3. verm. Aufl. gr. 8°. 284 Seiten. Mit 31 Fig. Brosch. *M* 6.50, geb. *M* 7.50.
- Liebetanz, Fr.** Handbuch der Calciumcarbid- und Acetylenechnik. Nach den neuesten Fortschritten und Erfahrungen geschildert. Zweite verm. Aufl. gr. 8°. 423 Seiten. Mit 257 Abbild. und 7 Tafeln. Brosch. *M* 12.—, geb. *M* 13.—.
- Liebetanz, Fr.** Gesetzliche Vorschriften über Herstellung und Benutzung von Acetylen nebst den Bestimmungen der Feuerversicherungs-Gesellschaften, Unfallverhütungs-Vorschriften und Transport-Bestimmungen für Calciumcarbid und Acetylen. Mit Anhang: Zolltarif für Calciumcarbid und Acetylenapparate. gr. 8°. 92 Seiten. Brosch. *M* 2.—.
- Liebetanz, Fr.** Hilfsbuch für Installationen von Acetylen-Beleuchtungsanlagen. kl. 8°. 104 Seiten mit 85 Abbild. Geb. *M* 3.75.
- Lindner, Elektr. Max.** Der Blitzschutz. Praktische Anleitung zur Projektierung, Herstellung u. Prüfung von Gebäude-Blitzableitern jeder Art auf Grund der neueren Anschauungen über das Wesen der Blitzentladungen. 8°. 176 Seiten mit 142 Abbildungen. *M* 4.—; geb. *M* 5.—.

- Loose**, Ingen. **Fritz**, und Ingen. **Max Schfemann**, Taschenbuch für Monteure elektrischer Strassenbahnen. Eine Anleitung zum Bau und zur Unterhaltung elektrischer Strassenbahnen mit Oberleitungs- und Akkumulatorenbetrieb. 2. Aufl. kl. 8^o. 131 S. Mit 112 Abbildungen, Millimeterpapier. Geb. *M* 1.50.
- Lux**, Ing. Dr. **H.** Die wirtschaftliche Bedeutung der Gas- und Elektrizitätswerke in Deutschland. Eine volkswirtschaftlich-technische Untersuchung. gr. 8^o. 131 Seiten. Mit 9 Figuren. Brosch. *M* 3.—, geb. *M* 4.—.
- Luxenberg**, Dr. **M.** Die Bogenlichtschaltungen und Bogenlicht-Gattungen. Zweite vermehrte Aufl. gr. 8^o. 51 Seiten mit 4 Figuren-Tafeln. Brosch. *M* 2.50.
- Maresch**, Ingenieur **Cornel**. Kraftmaschinen zum Betriebe dynamoelektrischer Stromerzeuger. Ein Lehr- und Nachschlagewerk für Elektrotechniker, Elektromonteure, Industrielle u. s. w. gr. 8^o. 236 Seit. Mit 261 Abbild. Brosch. *M* 4.25, geb. *M* 5.25.
- Neureiter**, Ingen. **Ferd.** Die Verteilung der elektrischen Energie in Beleuchtungsanlagen. 2. Aufl. gr. 8^o. 276 Seiten. Mit 136 Figuren. Brosch. *M* 9.—, geb. *M* 10.—.
- Pauls** Tabellen der Elektrotechnik. Zum praktischen Gebrauch für Techniker, Werkmeister, Monteure, Werkstattarbeiter. Maschinisten. 2. Aufl., bearbeitet v. Ingenieur Gust. Wilh. Meyer. kl. Quer-Format. 73 Seiten. *M* 1.40.
- Peschel**, Ing. **A.** Hilfsbuch für die Montage elektrischer Leitungen zu Beleuchtungszwecken. Für Elektrotechniker, Monteure und Installateure zur praktischen Anlage und Behandlung des Leitungsmaterials. 2. vermehrte Aufl. gr. 8^o. VI und 344 Seiten. Mit 589 Abbild. Brosch. *M* 6.—, geb. *M* 7.50.
- Praktische Anleitung zur Anlage von Blitzableitern. Mit 26 Abbildungen.** Vierte Auflage. 8^o. 44 Seiten. Brosch. *M* —.60.
- Prasch**, **Adolf**, u. **Hugo Wietz**. Die elektrotechnischen Maße. Lehrbuch zum Selbststudium. Dargestellt und durch zahlreiche Beispiele und 38 in den Text gedruckte Figuren erläutert. gr. 8^o. 153 Seiten. Brosch. *M* 3.—, geb. *M* 3.50.
- Riedel**, Elektro-Ing. **K.** Die Wechselstrom-Maschinen und die Drehstrom-Maschinen. Für Elektrotechniker, Monteure, Mechaniker, Schlosser etc. und zum Selbststudium in leicht verständlicher Darstellung. gr. 8^o. 114 Seiten. Mit 120 Fig. und 12 Tafeln. Brosch. *M* 3.50, geb. *M* 4.50.
- Rodet**, Prof. **J.** Berechnung der Leitungen für Mehrphasenströme. Autorisierte deutsche Übersetzung von Ing. M. Lachmann. gr. 8^o. 55 Seiten. Mit 22 Fig. Brosch. *M* 2.75.
- Rohrbeck**, Ing. **E.** Die Berechnung elektrischer Leitungen, insbesondere der Gleichstrom-Verteilungsnetze. 8^o. 76 Seiten. Mit 24 Abbild. und 3 Tafeln in zwei Farben. Brosch. *M* 2.50.
- Rosemeyer**, Elektrot. **Josef**. Dauerbrand-Bozenlampen. Eine leichtfaßliche Betrachtung über Bogenlampen im allgemeinen und Dauerbrandlampen im besonderen, sowie deren Verhältnisse zueinander. 8^o. 78 Seiten mit 41 Abbildungen. *M* 2.—.
- Rosenberg**, **E.**, Obering. Elektrische Starkstromtechnik. Eine leichtfaßliche Darstellung als Lehrbuch für Monteure, Techniker, Installateure, Schlosser und die Hilfsarbeiter in der Elektrotechnik, sowie für Laien. gr. 8^o. 296 Seiten mit 284 Abbild. Brosch. *M* 7.—, geb. *M* 8.—.
- Rühlmann**, Prof. Dr. **Richard**. Grundzüge der Gleichstrom-Technik. Eine gemeinfaßliche Darstellung der Grundlagen der Starkstrom-Elektrotechnik des Gleichstromes für Ingenieure etc. 2. verm. Auflage. gr. 8^o. 626 Seiten. Mit 400 Abbild. Brosch. *M* 14.—, geb. *M* 15.50.

- Rühlmann, Prof. Dr. Richard.** Grundzüge der Wechselstrom-Technik. Eine gemeinfaßliche Darstellung der Grundlagen der Elektrotechnik der Wechsel- und Mehrphasenströme. Zugleich Ergänzungsband zu: Grundzüge der Gleichstromtechnik. 2. vermehrte Aufl. gr. 8°. 624 Seiten. Mit 505 Abbild. Brosch. *M* 15.75, geb. *M* 17.—.
- Sack, J.,** Telegr.-Direktor. Elektrotechnisches Wörterbuch. Englisch-Deutsch; Französisch-Deutsch; Deutsch-Englisch-Französisch. Mit Zusätzen versehen von Ing. Arthur Wilke. gr. 8°. 123 Seiten. Brosch. *M* 4.50, geb. *M* 5.—.
- Saur, K.** Volt-Ampère-Watt-Pferdestärken. Dreizehn graphische Tafeln über die in der Praxis zumeist vorkommenden Werte und Wirkungsgrade. kl. Quer-Format. Mit 7 Bogen erläuterndem Text. geb. *M* 2.75.
- Schiemann, Ingen. Max.** Bau und Betrieb elektrischer Bahnen. Handbuch zu deren Projektierung, Bau und Betriebsführung. I. Bd.: Strassenbahnen. Dritte vermehrte Auflage. gr. 8°. 696 S. Mit 521 Abbildungen, 1 photolithographischen Tafel und 3 Tafeln Diagramme. Brosch. *M* 12.50, geb. *M* 14.—. II. Bd.: Haupt-, Neben-, Industrie- und gleislose Bahnen. Zweite und dritte Auflage. gr. 8°. 462 S. Mit 243 Abbildungen u. 31 Tafeln. Brosch. *M* 12.50, geb. *M* 14.—.
- Schiemann, Ingen. Max.** Die elektrischen Autobahnen. Gleislose Motorbahnen mit elektrischer Stromzuführung. Ein neues Verkehrsmittel, ein neuer Industriezweig, eine neue Kapitalanlage. gr. 8°. 35 Seiten mit 25 Abbild. *M* —.75.
- Schiemann, Ingen. Max.** Elektrische Fernschnellbahnen der Zukunft. Populäre volkswirtschaftliche Eisenbahnskizze. gr. 8°. 55 Seiten. Mit 6 Holzschn. u. 1 lithograph. Tafel. Brosch. *M* 1.50.
- Schmidt-Ulm, Ingen. Georg.** Die Wirkungsweise, Berechnung und Konstruktion der Gleichstrom-Dynamomaschinen und Motoren. Praktisches Handbuch für Elektrotechniker, Konstrukteure und Studierende an technischen Mittel- und Hochschulen. 2. vermehrte Auflage. 17 Bog. 8°. Mit 204 Abbild., 41 Tafeln Konstruktionsskizzen und 1 Diagrammtafel. Brosch. *M* 8.50, geb. *M* 9.60.
- Weil, Julius.** Die Entstehung und Entwicklung unserer elektrischen Strassenbahnen. In gemeinfaßlicher Darstellung. gr. 8°. 92 Seiten mit 67 Abbildungen. Brosch. *M* 3.—.
- Weil, Dr. Th.** Neuere Bogenlampen, deren Mechanismen und Anwendungsgebiete. Leitfaden durch das Gebiet der modernen Bogenlampentechnik in gemeinfaßlicher Darstellung. gr. 8°. 91 Seiten. Mit 120 Abbild. Brosch. *M* 3.50.
- Wietz, Hugo.** Die isolierten Leitungsdrähte und Kabel. Ihre Erzeugung, Verlegung und Unterhaltung. gr. 8°. 236 Seiten. Mit 159 Abbildungen. Brosch. *M* 7.—, geb. *M* 8.20.
- Wilke, Ingen. Arthur.** Über die gegenseitigen Beeinflussungen der Fernsprechleitungen nach Müller's Theorie. gr. 8°. 69 Seiten. Mit 39 Abbildungen. Brosch. *M* 1.—.
- Wilke, Ingen. Arthur.** Der elektrotechnische Beruf. Eine kurzgefaßte Darstellung des Bildungsganges und der Aussichten des Elektrotechnikers, des Elektrochemikers und der elektrotechnischen Gewerbetreibenden. Dritte vermehrte Auflage. gr. 8°. 127 Seiten. Brosch. *M* 2.—; geb. *M* 2.60.



WYDZIAŁY POLITECHNICZNE KRAKÓW

BIBLIOTEKA GŁÓWNA

II 5465
L. inw.

Kdn., Czapskich 4 — 678. 1. XII. 52. 10.000

Biblioteka Politechniki Krakowskiej



10000299109