

Biblioteka Politechniki Krakowskiej



10000294816

ELEKTRISCHE WECHSELSTRÖME.

Von

Gisbert Kapp,

M. Inst. C. E., M. Inst. E. E.

Autorisierte deutsche Ausgabe

von

Hermann Kaufmann,

Ingenieur.

Mit zahlreichen in den Text gedruckten Figuren.

Dritte verbesserte Auflage.

13/1

F. Nr. 23694



Leipzig

Verlag von Oskar Leiner

1900.

F. 15

x
2.224

II 5411



Ark. Nr.

5460/50

Vorwort zur ersten Auflage.

Angeregt durch die Lektüre des englischen Buches »Alternating Currents of Electricity« von Gisbert Kapp, kam Unterzeichneter auf den Gedanken, das Werk ins Deutsche zu übertragen.

Ich glaube hiermit der deutschen elektrotechnischen Litteratur einen wirklichen Dienst zu leisten; denn ganz abgesehen davon, dass der Name des in Deutschland wohlbekannten Verfassers schon etwas Vorzügliches gewährleistet, entspricht das vorliegende Buch einem thatsächlichen Bedürfnis.

Wir besitzen allerdings umfangreiche Werke deutschen Ursprunges, welche das Gebiet des Wechselstromes behandeln; ich möchte jedoch behaupten, dass sie für das Anfangsstudium des Wechselstromes durchweg zu wissenschaftlich und zu breit gehalten sind. Im Gegensatze zu ihnen zeichnet sich das kleine Werk des Herrn Kapp durch eine hervorragend klare und einfache Behandlung aus.

Ich hoffe, dass diese Eigenschaft des englischen Werkchens durch die Übersetzung nicht gelitten hat, zumal ich bemüht war, mich ganz in den Gedankengang des Verfassers einzuleben.

Ausführlicher behandelt habe ich nur die Rechnungen, speziell die Integralgleichungen, weil ich glaube, dass es einem angehenden Elektrotechniker, denn für einen solchen ist das bescheidene Werkchen in erster Linie bestimmt, einige Schwierigkeit bereiten würde, der sehr knappen Rechnungsform im englischen Original ohne weiteres zu folgen.

Ausserdem sind sämtliche Masse ins Decimalsystem umgewandelt.

Schliesslich bleibt mir noch die angenehme Pflicht, dem Herrn Verfasser meinen verbindlichsten Dank dafür auszusprechen, dass er die Güte hatte, mich mit der Übersetzung seines Werkes zu betrauen, und ferner dem Herrn Verleger für sein bereitwilliges Entgegenkommen bei Übernahme des Buches in seinen geschätzten Verlag.

Hannover, im Juli 1894.

Hermann Kaufmann,
stud. rer. electr.

Vorwort zur zweiten Auflage.

Meine Vermutung, dass das vorliegende Werkchen über »Elektrische Wechselströme« auch in der deutschen Litteratur willkommen sein würde, hat sich durch die Thatsache bestätigt, dass dasselbe im Verlauf von zwei Jahren im Buchhandel bereits vergriffen ist.

Als ich an die Neu-Auflage des Kapp'schen Werkchens herantrat, wurde ich vor die Frage gestellt, ob irgend welche Ergänzungen bezw. Erweiterungen dem Buche dienlich sein könnten. Ich habe diese Frage, welche bei dem rastlosen Fortschritt gerade der Wechselstromtechnik wohl berechtigt ist, mit dem nunmehr in Deutschland weilenden Verfasser des englischen Originals, Herrn Ingenieur Gisbert Kapp, wohl erwogen und bin zu dem Resultat gekommen, dass etwaige Erweiterungen den Charakter des Buches als Einführung in das Studium des Wechselstromes nur stören würden.

Meine Thätigkeit für die Neu-Auflage bezog sich daher lediglich auf Beseitigung der trotz grösster Sorgfalt bei der ersten Auflage unterlaufenen Fehler und einige redaktionelle Änderungen einfacher Natur.

Möge die zweite Auflage der »Wechselströme« sich in gleicher Weise Freunde erwerben, wie es der ersten Auflage bereits gelungen ist.

Berlin, im Februar 1897.

Hermann Kaufmann,
Ingenieur.

Vorwort zur dritten Auflage.

Nach dem erfolgten Hinscheiden des Herrn Ingenieur Hermann Kaufmann hatte Herr Generalsekretär Gisbert Kapp die Güte, die Durchsicht des Werkes für die dritte Auflage zu bewirken.

Leipzig, im Oktober 1900.

Die Verlagsbuchhandlung.

Inhaltsverzeichnis.

— 2 —

Kapitel	Seite
I. Einleitung	1 — 14
II. Messung der Spannung, des Stromes und der Energie	15 — 19
Anhang I, II, III, IV	19 — 25
III. Bedingung für die Maximalleistung	26 — 29
Anhang	29 — 30
IV. Wechselstrommaschinen	31 — 39
V. Mechanische Konstruktion der Wechselstromdynamos	40 — 44
VI. Beschreibung einiger Wechselstrommaschinentypen	45 — 49
VII. Transformatoren	50 — 56
VIII. Wechselstromcentralstationen und Verteilung von Wechsel- strömen	57 — 63
IX. Beispiele ausgeführter Centralstationen	64 — 67
X. Parallelschalten von Wechselstrommaschinen	68 — 69
XI. Wechselstrommotoren	70 — 74
XII. Von selbst angehende Wechselstrommotoren	75 — 76
XIII. Mehrphasenströme	77 — 85
Tafel I und II von Transformatorenentwürfen	86 — 87
Alphabetisches Inhaltsverzeichnis	88 — 92



Elektrische Wechselströme.

Ihre Erzeugung, Messung, Verteilung und Anwendung.

Kapitel I.

Einleitung.

Wenn wir im allgemeinen von elektrischen Strömen sprechen, so sind wir gewohnt, sie als materielle Ströme anzusehen, als ein gewisses Etwas, welches an einem durch den Leiter gebildeten Pfade entlang läuft und deshalb eine bestimmte Richtung hat. Wir sagen, dass die Elektrizität an dem Leiter entlang oder durch den Leiter hindurchfließt von dem Punkte höheren zu dem niederen Potentials, in derselben Weise, wie das Wasser vom höheren zum niederen Niveau durch eine Röhre fließt.

Eine derartige Anschauung ist natürlich rein konventionell. Als feststehende Thatsache wissen wir weder, ob es die positive Elektrizität ist, welche in einer gegebenen Richtung fließt, oder die negative Elektrizität, welche in der entgegengesetzten Richtung fließt, oder aber ob beide Elektrizitäten gleichzeitig in einander entgegengesetzten Richtungen fließen, oder schliesslich ob überhaupt irgend eine Übertragung der Elektrizität durch den Draht stattfindet. Allerdings nehmen wir den heutigen Anschauungen entsprechend¹⁾ eine wirkliche Übertragung der elektrischen Energie an, jedoch nicht durch den Draht selbst, sondern durch den Raum, welcher den Draht umgiebt.

Von einem elektrischen Strome zu sprechen, welcher durch einen Draht fließt, mag deshalb eine unwissenschaftliche Art sein,

¹⁾ Siehe hierüber: Dr. Heinrich Hertz. Die Ausbreitung der elektrischen Kraft. (Anmerkung des Übersetzers.)

unsere Auffassung auszudrücken; es ist jedoch eine sehr bequeme und infolgedessen allgemein angenommene Ausdrucksweise. Wenn wir nun diese Auffassung, dass ein gewisses Etwas, »Elektrizität« genannt, an einem vorgeschriebenen Pfade entlang fliesst, annehmen, so haben wir auch zugleich den Gedanken angenommen, dass dieses Fliesen in einer Richtung geschieht, welche in jedem gegebenen Falle vollkommen bestimmt ist. Wir haben keinen Sinn, mit Hilfe dessen wir einen elektrischen Strom direkt wahrnehmen oder seine Richtung erkennen könnten. Wenn wir einen elektrischen Schlag erhalten, sind wir allerdings gewahr geworden, dass ein Strom durch uns hindurchgegangen ist; aber keine noch so grosse Anzahl von Schlägen wird uns auch nur im geringsten zu dem wahren Verständnis der elektrischen Ströme führen, noch auch uns befähigen, ihre Richtung festzustellen. Wir müssen deshalb damit zufrieden sein, nicht die Ströme selbst, sondern lediglich ihre chemischen, thermischen, magnetischen und mechanischen Wirkungen zu studieren. Unter anderem müssen wir auch die Stromrichtung durch die eine oder die andere dieser Wirkungen feststellen. Wir wissen z. B., dass ein Draht, welcher in der Nord-Südrichtung über eine Magnetnadel ausgestreckt ist und Strom führt, die Nadel abzulenken pflegt. Wenn der nordsuchende Pol nach links oder nach Westen abgelenkt wird, so wissen wir nach der Ampère'schen Regel, dass der Strom von Süden nach Norden fliesst. Umgekehrt schliessen wir, wenn die Ablenkung nach der entgegengesetzten Seite erfolgt, dass der Strom von Norden nach Süden fliesst. Wenn wir nun den Strom von einer Batterie ohne Einschaltung irgend eines beweglichen Apparates, wie z. B. eines Stromwenders (oder Kommutators), erhalten, so beobachten wir, dass die einmal abgelenkte Nadel in jener Lage so lange bleibt, als der Strom fliesst, und wir schliessen natürlicherweise, dass der Strom in derselben Richtung fliesst, dass wir es also thatsächlich mit einem »Gleichstrom« zu thun haben. Gesetzt nun, wir bemerkten, dass die Nadel, nachdem sie eine gewisse Zeit nach links abgelenkt blieb, nach rechts hinüber schwingen und in jener Lage eine gleiche Zeit abgelenkt bleiben würde, dass sie dann wieder nach links schwingen und so abwechselnd diese beiden entgegengesetzten Lagen einnehmen würde; wir würden dann unmittelbar schliessen, dass irgend jemand einen Stromwender in unseren Stromkreis eingeschaltet hätte und sich ein Vergnügen daraus machte, diesen in regelmässigen Zwischenräumen umzuschalten. Das Verhalten der Nadel würde uns thatsächlich gezeigt haben, dass wir es nicht mehr mit einem Gleichstrom zu thun haben, sondern dass unser Strom ein »Wechselstrom« geworden ist, das heisst ein Strom, welcher seine

Richtung periodisch ändert. Ich will bemerken, dass ich angenommen habe, dass die Nadel Zeit hätte, jedem Stromimpuls zu folgen, mit anderen Worten, dass die periodische Zeit des Stromes gross ist im Vergleich zu der Schwingungszeit der Nadel. Angenommen jedoch, ich bethätige den Stromwender so schnell, dass die Nadel den einzelnen Impulsen nicht folgen könnte; in diesem Falle wird sie natürlich in ihrer Nord-Südrichtung bleiben, sie wird also als Instrument zur Nachweisung eines Wechselstromes unbrauchbar geworden sein. Wir suchen daher einen Apparat, welcher viel bereitwilliger auf die einzelnen, sehr schnell aufeinander folgenden Impulse anspricht als eine träge Kompassnadel. Wir erhalten einen solchen Apparat, wenn wir eine Eisenscheibe nehmen und nahe an ihren Mittelpunkt eine Spule von isolierten Drahtwindungen, welche einen Teil des Stromkreises bilden, oder besser noch einen Elektromagneten mit einem laminierten Kerne halten; warum der Kern laminiert, das heisst in dünne Scheiben zerteilt sein soll, werde ich später erklären. Fürs erste interessiert uns nur festzustellen, dass die Pole sich in einer solchen Lage befinden müssen, dass wenigstens einer von ihnen auf die Eisenscheibe wirken kann. Deshalb würde ein Ringmagnet, welcher keine freien Pole besitzt, für unseren Zweck nicht brauchbar sein; ein gestreckter Stabmagnet jedoch wird Verwendung finden können. Nun wollen wir beobachten, was sich ereignet, wenn ein Wechselstrom durch die Elektromagnetspule geschickt wird. In dem Augenblicke, wo wir den Schlüssel niederdrücken, um den Stromkreis zu schliessen, fängt die Batterie an, einen Gleichstrom durch die Spule zu schicken, und der Kern beginnt magnetisch zu werden. Die Magnetisierung wächst von Null bis zu einem Maximum und behält diesen Wert so lange, bis der Schlüssel wieder geöffnet wird, worauf sie dann wieder zu Null abfällt. Nun kehren wir den Strom um, und derselbe Prozess wiederholt sich. Es ist selbstverständlich, dass bei jeder Stromumkehr die Magnetisierung durch Null gehen und das Ende des Kernes, welches der Eisenscheibe gegenübersteht, abwechselnd ein Nord- und Südpol werden muss. Die Eisenscheibe wird deshalb abwechselnd angezogen und losgelassen werden, oder mit anderen Worten, sie wird schwingen, und wenn die Schwingungsperiode kurz genug ist, das heisst wenn ich den Stromwender sehr schnell bethätige, so wird ein musikalischer Ton erzeugt werden. Umgekehrt, wenn ich einen Elektromagneten einer Eisenscheibe nähere und finde, dass die letztere nicht dauernd angezogen wird, sondern in Schwingung versetzt wird und einen musikalischen Ton aussendet, so schliesse ich, dass der Strom, welcher durch die Spule des Elektromagneten fliesst, ein Wechselstrom ist und dass die

Schnelligkeit der Wechsel oder, wie man zu sagen pflegt, die »Frequenz« des Stromes nach der Höhe des Tones beurteilt werden kann. Bei der Erklärung dieses Experiments habe ich der Einfachheit halber angenommen, dass der Strom von einer Batterie geliefert wird und dass sein wechselnder Charakter mit Hilfe eines Stromwenders hervorgebracht wird. Dieser Mechanismus ist jedoch kein wesentlicher Teil des Experiments oder seiner Erklärung. Der wesentliche Teil besteht darin, dass der Strom von Null bis zu einem Maximum anwachsen und wieder bis zu Null abnehmen, dann seine Richtung ändern und bis zu einem negativen Maximum anwachsen, bis Null abnehmen, darauf wieder positiv werden soll, und so fort. Ein derartiger Strom wird von einer gewissen Art elektrischer Maschinen, nämlich den Wechselstromdynamos, mit welchen wir uns im folgenden noch eingehend beschäftigen werden, erzeugt. Ehe ich jedoch näher auf diesen Gegenstand eingehe, möchte ich die Thatsache experimentell nachweisen, dass ein Wechselstrom diese oscillierenden oder wellenartigen magnetischen Wirkungen, welche ich soeben beschrieb, hervorbringen kann. Der Apparat, welchen ich für meine Erläuterungen brauchen werde, ist äusserst einfach. Ich nehme einen kleinen Elektromagneten von der Art, wie sie in Wechselstrombogenlampen benutzt werden und welcher technisch als »Drosselspule« bezeichnet wird. Als Eisenscheibe nehme ich ein gewöhnliches Stück Weissblech, und wir werden bemerken, dass, wenn ich ein Ende der Drosselspule dem Weissblech nähere, dieses einen Ton aussendet, welcher im ganzen Zimmer gehört werden kann. Der Ton ist nicht musikalisch rein, weil, wie bei einer so rohen Vorrichtung nicht anders erwartet werden kann, die Elastizität der Eisenscheibe keineswegs vollkommen ist. Dennoch erfüllt die Vorrichtung ihren Zweck, da sie zeigt, dass die Eisenscheibe durch den Strom in Schwingung versetzt wird, und thatsächlich stellt jeder Telephonempfänger denselben Vorgang dar.

Das Studium der Wechselströme wird sehr erleichtert durch eine rationelle und einfache Art, sie graphisch darzustellen. Es giebt verschiedene Wege, mit deren Hilfe wir nicht nur Wechselströme, sondern überhaupt allgemein Vorgänge darstellen können, die sich periodisch ändern. Der gewöhnlichste Weg, einen Wechselstrom darzustellen, besteht darin, eine Kurve zu zeichnen, deren beide Koordinaten die Zeit und die augenblickliche Stromstärke sind. In Fig. 1 wird die Zeit auf der Horizontalen und die Stromstärke auf der Vertikalen gemessen. Wir erhalten so eine Wellenlinie, welche in regelmässigen Zwischenräumen die Abscissenachse schneidet. Diese Schnittpunkte bezeichnen die Nullwerte der Stromstärke; von ihnen aus steigt sie zu ihrem positiven Maximum,

wenn die Kurve oberhalb der Abscissenachse liegt, und zu ihrem negativen Maximum, wenn die Kurve unterhalb der Achse liegt. Die genaue Gestalt der Kurve hängt von der Konstruktion der Maschine ab, welche den Wechselstrom erzeugt; jedoch kann ich schon von vornherein bemerken, dass man bei fast allen theoretischen Untersuchungen über Wechselströme annimmt, dass die Kurve einer Sinusfunktion folgt oder vielmehr eine solche darstellt und dass diese Annahme für alle praktischen Fälle der Wahrheit hinreichend nahe kommt. Alle meine Leser werden natürlich wissen, was eine Sinuskurve ist, und ich brauche sie deshalb nicht erst zu erklären. Da mich aber der Weg, auf dem eine Sinuskurve entsteht, zu einer zweiten Methode führt, wie man einen Wechselstrom graphisch darstellen kann, so muss ich einige Worte darüber sagen.

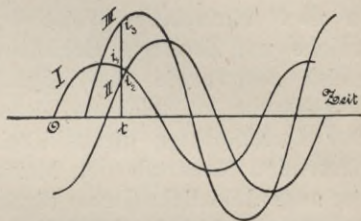


Fig. 1.

Wir wollen uns vorstellen, wir ständen in einiger Entfernung von einer Dampfmaschine gerade in einer Linie mit der Cylinderachse und sähen nach dem Kurbelzapfen. Der letztere scheint sich dann auf und ab zu bewegen, während er sich nach beiden Seiten gleich weit vom Mittelpunkte der Kurbelwelle entfernt. Wir sehen in Wirklichkeit die Projektion der Kurbel auf eine Vertikale, und die Länge dieser Projektion ist in jedem Augenblicke gleich der Länge der Kurbel multipliziert mit dem Sinus des Winkels, welchen die Kurbel in diesem Augenblicke mit der Horizontalen bildet.

Der Winkel ist natürlich das Produkt aus der Winkelgeschwindigkeit und der Zeit; da nun die Winkelgeschwindigkeit konstant ist, so werden wir auch eine Sinuskurve erhalten, wenn wir die Zeit auf der Horizontalen und die Projektion der Kurbel auf der Verticalen auftragen.

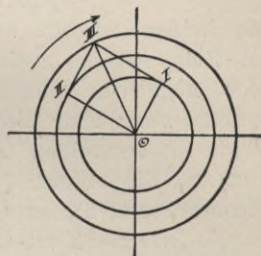


Fig. 2.

Die Kurve I in Fig. 1 ist so erhalten worden. Wir können uns jedoch die Mühe, diese Kurve aufzuzeichnen, sparen, denn wir können den Wechselstrom noch einfacher durch die Vertikalprojektion einer Geraden OI (Fig. 2) darstellen, welche sich mit konstanter Winkelgeschwindigkeit um den festen Mittelpunkt O dreht.

Die Länge von OI stellt für irgend einen passenden Massstab den Maximalwert des Stromes oder den Kamm der Stromwelle dar, und die Projektion zeigt den augenblicklichen Wert des Stromes.

Wir sehen, dass dieser Wert für eine halbe Umdrehung positiv und für die andere Hälfte der Umdrehung negativ ist.

In diesem Diagramm, welches man ein »Vektordiagramm« nennt, müssen wir deshalb eine Projektion ausführen, um den augenblicklichen Wert des Stromes zu finden. Dies ist weniger mühsam, als eine Sinuskurve zu zeichnen; dennoch ist es möglich, den Strom in noch einfacherer Weise darzustellen. Diejenigen meiner Leser, welche mit Zeuner's Schieberdiagramm vertraut sind, werden so gleich sehen, wie dies möglich ist. Anstatt den Kreis um O als Mittelpunkt zu zeichnen, lassen wir ihn durch O hindurch gehen. Der Durchmesser dieses Kreises (Fig. 3) stellt für irgend einen passenden Massstab den Maximalwert des Stromes dar. Dann ist der augenblickliche Strom direkt durch die Länge der sich drehenden Geraden zwischen O und dem Kreise, also durch OI (Fig. 3) gegeben. Um die negativen Werte des Stromes zu erhalten, zeichnen wir einen gleichen Kreis auf der entgegengesetzten Seite; derselbe ist der Fig. 3 nach unten gegeben.

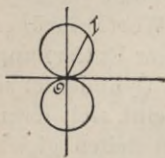


Fig. 3.

Um den Gebrauch von irgend einer dieser graphischen Methoden, wie man Wechselströme darstellen kann, noch deutlicher zu machen, wollen wir annehmen, dass wir die folgende Aufgabe zu lösen hätten: Wir haben einen mit zwei unabhängigen Drahtspulen bewundenen Eisenkern, und jede der Spulen wird von einem Wechselstrom durchflossen.

Die beiden Ströme sollen dieselbe Frequenz haben, das heisst die Zeit, welche zwischen zwei aufeinander folgenden positiven oder negativen Maximalwerten verläuft, soll für beide Ströme dieselbe sein; aber die Maximalwerte in den beiden Strömen sollen nicht in demselben Augenblicke erreicht werden. Mit anderen Worten, die »Phase«, das heisst der Bewegungszustand des einen Stromes, soll hinter der Phase des anderen zurückbleiben, gerade so wie in einer Zwei-Cylinder-Dampfmaschine eine Kurbel hinter der anderen zurückbleibt. Die Aufgabe nun, welche wir zu lösen haben, lautet: Wie wird die Magnetisierung des Kernes in irgend einem Augenblicke beschaffen sein? Um diese Frage beantworten zu können, müssen wir natürlich den augenblicklichen Wert der erregenden Kraft oder die Ampèrewindungen, welche aus der vereinigten Wirkung beider Ströme hervorgehen, kennen; wir müssen in Wirklichkeit finden, was für ein resultierender Strom, wenn er allein wirkt, dieselbe Magnetisierung hervorbringt wie die beiden gegebenen Ströme, wenn sie zusammen wirken. Es mögen in Fig. 1 die Kurven I und II die beiden Ströme oder besser noch die Ampèrewindungen dieser Ströme darstellen; dann werden die

Ampèrewindungen des resultierenden Stromes gefunden, indem man für jeden Punkt der Abscisse die algebraische Summe der Ordinaten aufträgt. Auf diese Weise erhalten wir Kurve III. Es ist selbstverständlich und bedarf deshalb keines strengen Beweises, dass diese Kurve auch aus Fig. 2 erhalten werden kann, wenn wir in dieser Figur ein Parallelogramm der Ströme zeichnen (genau in derselben Weise, wie wir in der Mechanik ein Parallelogramm der Kräfte zeichnen) und die Resultierende O III benutzen, um die Sinuskurve III der Fig. 1 zu finden. Wir sehen, dass wir Ströme in derselben Weise wie mechanische Kräfte miteinander vereinigen können. Ich habe dieses bewiesen für den Fall, dass die Ströme in zwei voneinander unabhängige Spulen fließen; aber ein Blick auf Fig. 4 wird uns zeigen, dass es ebenfalls gültig ist, wenn die beiden Ströme durch dieselbe Spule geschickt werden. Wir haben

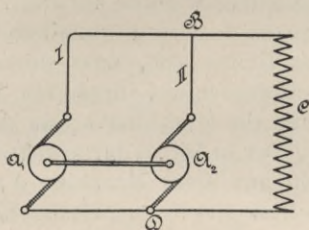


Fig. 4.

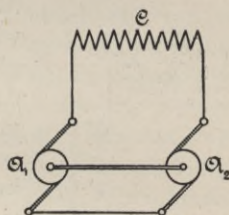


Fig. 5.

hier zwei Maschinen, A_1 und A_2 , welche mechanisch miteinander gekuppelt sind und deshalb Ströme von derselben Frequenz hervorbringen. Diese Ströme, I und II , fließen in einen einzigen Stromkreis, welcher eine Spule C enthält. Es ist augenscheinlich, dass in dem Stromkreise BCD nur ein Strom fließt, welcher gleich der algebraischen Summe von I und II ist.

Nun wollen wir die Anordnung in diejenige umändern, welche Fig. 5 zeigt. Hier haben wir nur mit einem einzigen Strome zu thun, denn beide Maschinen und die Spule C sind in Reihe geschaltet; aber wir haben es mit zwei elektromotorischen Kräften, nämlich mit denjenigen der beiden Maschinen, zu thun. Ich nehme an, dass die Spule C an sich keine elektromotorische Kraft hat. In diesem Falle ist es ebenfalls selbstverständlich, dass der Strom, welcher durch C getrieben wird, der algebraischen Summe der beiden elektromotorischen Kräfte entspricht und dass alles, was ich über die Bestimmung des resultierenden Stromes gesagt habe, direkt auf die resultierende elektromotorische Kraft anwendbar ist. Mit

anderen Worten, wir können irgend eine der drei graphischen Methoden zur Darstellung der Ströme auch zur Darstellung der elektromotorischen Kräfte benutzen.

Diese graphischen Untersuchungsmethoden und besonders diejenigen, welche auf dem Vektordiagramm beruhen, sind so nützlich und so einfach, dass ich sie im folgenden häufig und sogar lieber anwenden werde als die analytischen Methoden; deshalb ist es ratsam, sich von vornherein mit dem Vektordiagramm vertraut zu machen. Zu diesem Zwecke wähle ich beispielsweise einen Fall aus, welcher sehr häufig vorkommt und welcher durch Fig. 6 dargestellt wird. Damit der Leser nicht glaubt, dass dieser Fall bloss theoretische Bedeutung hat, kann ich sogleich vorausschicken, dass eine gewisse Ableitung, welche naturgemäss aus seiner Betrachtung hervorgeht, von grosser praktischer Bedeutung für Motoren ist, die durch Mehrphasenströme angetrieben werden, weil hiervon das

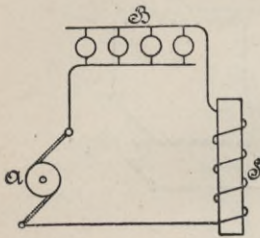


Fig. 6.

Angehen derartiger Motoren abhängt. Wenn wir die Figuren 5 und 6 miteinander vergleichen, so finden wir, dass sie sich nur dadurch unterscheiden, dass ein Elektromagnet S für die Maschine A₂ an die Stelle getreten ist. Der in Fig. 6 dargestellte Stromkreis besteht aus einer Maschine A, welche eine wechselnde elektromotorische Kraft liefert, aus einem Widerstande B, welcher aus einer Reihe Glühlampen besteht, und aus einem Elektromagneten S. Dieser Elektro-

magnet hat eine Eigenschaft, welche man technisch als »Selbstinduktion« bezeichnet, und ehe wir weitergehen, muss ich kurz erklären, was man unter Selbstinduktion versteht. Wir wissen, dass eine elektromotorische Kraft in einem Drahte entsteht, sobald der Draht magnetische Kraftlinien schneidet. Da nun der Draht notwendigerweise einen Teil des geschlossenen Stromkreises bilden muss (denn wenn der Stromkreis nicht geschlossen wäre, so würde kein Strom vorhanden sein), so muss das Schneiden von Kraftlinien von einer Zunahme oder Abnahme in der Zahl der Kraftlinien oder der totalen Induktion, welche den Stromkreis durchdringt, begleitet sein, und wir können deshalb auch sagen, dass jedesmal, wenn sich die totale Induktion in einem Stromkreise ändert, eine elektromotorische Kraft in dem Stromkreise entsteht, die um so grösser ist, je schneller die Änderung vor sich geht. Thatsächlich ergibt der Betrag der Änderung, das heisst die Zahl der Kraftlinien, welche pro Sekunde hinzukommen oder verschwinden, multipliziert mit der Zahl der Drahtwindungen, die elektromotorische

Kraft, welche durch die Änderung in der Spule entsteht. Gehen wir auf Fig. 1 zurück, so haben wir dort gesehen, dass die Kurve I den Strom als eine Funktion der Zeit darstellt. Angenommen, es wäre keine weitere Spule auf den Kern aufgewickelt, dann stellen die Ordinaten der Kurve zu einem passenden Massstabe auch die erregende Kraft des Kernes dar, und es liegt auf der Hand, dass die Magnetisierung des Kernes oder, korrekt ausgedrückt, die totale Induktion, die durch den Kern geht, sich mehr oder weniger in Übereinstimmung mit der Kurve I ändern wird. Wenn die Permeabilität, das heisst die magnetische Leistungsfähigkeit, konstant wäre, so würde die Induktion der erregenden Kraft streng proportional sein, und es könnte durch Wahl eines passenden Massstabes die Kurve, welche die Induktion darstellen soll, in Übereinstimmung mit der Stromkurve I gebracht werden. Nun können wir für niedrige Werte der Induktion, sagen wir zwischen Null und 3000 oder 4000 Kraftlinien pro Quadratcentimeter, die Permeabilität von weichem, gut ausgeglühtem Schmiedeeisen als nahezu konstant betrachten, und wenn wir die Induktion nicht über diesen Punkt hinaustreiben, so können wir ohne grossen Fehler annehmen, dass die Stromkurve I auch die totale Induktion des Kernes darstellt. Für die Punkte, wo der Strom durch Null geht und welche uns augenblicklich am meisten interessieren, ist die Annahme natürlich vollkommen richtig. Wenn aber die Kurve I die totale Induktion darstellt, so stellt die geometrische Tangente an dieselbe in irgend einem Punkte die Änderung der Induktion in der Zeiteinheit dar oder, wie ich soeben sagte, den Betrag der Änderung der Induktion gerade in demjenigen Augenblicke, welcher durch den betreffenden Kurvenpunkt dargestellt wird. Auf diese Weise können wir, wenn wir die Zeit auf der Horizontalen ablesen und die Tangente an die Stromkurve in den entsprechenden Punkten ziehen, den Betrag finden, um welchen die totale Induktion sich in jedem Augenblicke ändert. Ich erwähnte schon, dass der Betrag der Änderung, multipliziert mit der Windungszahl auf der Spule, die elektromotorische Kraft ergibt, welche in irgend einem Augenblicke in der Spule erzeugt wird, und es wird dem Leser jetzt klar sein, dass diese elektromotorische Kraft, welche wir die »elektromotorische Kraft der Selbstinduktion« nennen, der geometrischen Tangente an die Stromkurve proportional sein muss. Je steiler diese Linie ist, um so grösser ist die elektromotorische Kraft. Daher erkennen wir, dass, wenn der Strom ein positives oder negatives Maximum ist, die Tangente horizontal verläuft; deshalb ist die elektromotorische Kraft der Selbstinduktion in diesem Augenblicke Null. Auf jeder der beiden Seiten des Maximalstromes aber hat sie einen endlichen Wert, und zwar ist dieser Wert positiv auf der

einen Seite und negativ auf der anderen Seite des Maximalstromes, da sich ja die Richtung der Tangente von aufwärts nach abwärts ändert, wenn sie diesen Punkt passiert. Da, wo die Stromkurve die Horizontale schneidet, ist die Steigung der Tangente augenscheinlich am grössten, und wir sehen deshalb, dass die elektromotorische Kraft der Selbstinduktion ein Maximum ist, wenn der Strom durch Null geht; dagegen ist sie selbst gleich Null, wenn der Strom ein Maximum ist. Dies ist also allgemein die Beziehung zwischen der Stromkurve und der Kurve, welche die elektromotorische Kraft darstellt. Es erübrigt jetzt noch, die wahre Natur des letzteren zu ermitteln. Wir haben gesehen, dass die Ordinaten der Kurve der elektromotorischen Kraft den geometrischen Tangenten proportional sind, die an der Stromkurve gezogen wurden. Wie ziehen wir aber die Tangente z. B. an den Punkt A der Stromkurve in Fig. 7? Wir ziehen eine Gerade durch diesen Punkt und eine zweite durch einen dem Punkte A sehr nahe gelegenen Punkt an die Stromkurve; genau genommen, sollte ich sagen, durch einen Punkt, welcher A unendlich nahe liegt. An diesem unendlich nahen Punkt, wird der Strom von i zu $i + di$ und die Zeit von t zu $t + dt$ zugenommen haben, wenn i und t die Ordinate und Abscisse des Punktes A sind. Das Verhältnis von di zu dt ist deshalb gleich der geometrischen Tangente in A. Dieses Verhältnis ist aber der Differentialquotient des Stromes in Bezug auf die Zeit, und wir finden in folgedessen, dass die Kurve der elektromotorischen Kraft der Selbstinduktion der erste Differentialquotient der Stromkurve ist.

Ich habe bis jetzt den Gebrauch der Mathematik ganz vermieden, aber nun wird es notwendig, einige einfache Formeln einzuführen. Indem wir auf Fig. 2 zurückgehen, wollen wir annehmen, dass der Radius OI , dessen Projektion den augenblicklichen Wert des Stromes angiebt, n vollständige Umdrehungen pro Sekunde macht. Seine Winkelgeschwindigkeit ist dann $\omega = 2\pi n$ und seine Winkelage zur Zeit t ist $\alpha = \omega t$, wenn wir die Zeit von dem Augenblicke an rechnen, wo der Radius horizontal ist. Nennen wir J die Länge des Radius, welche zugleich das Maximum der Stromstärke oder den Kamm der Welle darstellt, so ist der augenblickliche Wert des Stromes zur Zeit t

$$i = J \sin \omega t \dots\dots\dots 1)$$

und die elektromotorische Kraft der Selbstinduktion in jenem Augenblicke ist

$$e_s = L \omega J \cos \omega t \dots\dots\dots 2)$$

wo L ein Koeffizient ist, welcher von der Permeabilität des Kernes, von dem magnetischen Widerstande des ganzen magnetischen Kreises

widersetzt sich die positive elektromotorische Kraft der Selbstinduktion, aber der Widerstand wird schwächer in dem Masse, wie der Strom stärker wird, und so setzt sich der Wechsel zwischen dem Antreiben und Hemmen des Stromes durch die Selbstinduktion fort.

Der Punkt, welcher uns am meisten interessiert, ist folgender: Welches muss die durch die Maschine A in Fig. 6 erzeugte elektromotorische Kraft sein, um den Strom hervorzubringen, welcher durch die Kurve in Fig. 1 dargestellt wird? Um unsere Untersuchung zu vereinfachen, wollen wir annehmen, dass der Ohm'sche Widerstand der Spule S und der Maschine A vernachlässigt werden kann im Vergleich zu dem Ohm'schen Widerstande der Glühlampenreihe B, oder dass er hierin mit eingeschlossen sei; ferner dass der einzige Teil des Stromkreises, welcher Selbstinduktion besitzt, die Spule S ist. Dann ist ohne weiteres klar, dass ein Spannungsmesser, welcher an die Enden dieser Spule geschaltet ist, die elektromotorische Kraft der Selbstinduktion anzeigen wird und dass ein Spannungsmesser, welcher an die Lampe gelegt ist, die elektromotorische Kraft anzeigen wird, welche dem Produkte aus dem Strome und dem Widerstande der Glühlampenreihe entspricht. Es ist aber nicht ohne weiteres selbstverständlich, dass die Summe dieser beiden Ablesungen uns die elektromotorische Kraft ergeben wird, welche durch einen Spannungsmesser an den Klemmen der Maschine gemessen wird, und ich will so-



Fig. 8.

gleich theoretisch und praktisch zeigen, dass dies nicht der Fall ist. Wenn ich den Widerstand der Glühlampenreihe zu einer bestimmten Grösse r annehme, so ist es klar, dass die augenblickliche Lampenspannung gleich dem Produkte r ist und dass diese durch eine Sinuskurve e_r von derselben Phase wie die Stromkurve dargestellt werden kann. In Fig. 8 muss deshalb der Radius der maximalen Lampenspannung OE_r der Richtung nach zusammenfallen mit dem Radius des Maximalstromes OJ . Der Radius der maximalen Spannung der Selbstinduktion ist OE_s und dieser bleibt, wie ich schon gezeigt habe, hinter dem Stromradius um 90 Grad zurück. Um die Maschinenspannung in irgend einem Augenblicke zu finden, müssen wir die Kurven e_r und e_s vereinigen, aber daran denken, die letztere mit dem entgegengesetzten Vorzeichen zu nehmen, da die Selbstinduktion sich dem Strome widersetzt. Dies ergibt die Kurve e in Fig. 7. Um die Maschinenspannung aus Fig. 8 zu finden, haben wir einen Radius von solcher Länge und Richtung

zu ziehen, dass er als die Resultierende der Lampenspannung E_r und einer elektromotorischen Kraft, welche derjenigen der Selbstinduktion diametral entgegengesetzt ist, betrachtet werden kann. Wir verlängern deshalb die Gerade $E_s O$ über O hinaus und machen $OE'_s = OE_s$. Wenn wir jetzt das Parallelogramm vervollständigen, so finden wir die Resultierende OE , welche uns die maximale Maschinenspannung oder die »induzierte elektromotorische Kraft« giebt.

Das Diagramm (Fig. 8) ist sehr lehrreich. Vor allem setzt es uns sogleich in den Stand, einen Ausdruck für den Phasenverschiebungswinkel φ zu finden. Wir sehen, dass die Tangente dieses Winkels durch das Verhältnis der elektromotorischen Kraft der Selbstinduktion zu derjenigen Spannung ist, welche in den Lampen nützlich verbraucht wird. Ich muss hierbei bemerken, dass ich, wenn ich von der elektromotorischen Kraft und dem Strome spreche, für den Augenblick immer ihre Maximalwerte meine. Behalten wir die oben angewendeten Bezeichnungen bei, so haben wir

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \varphi &= \frac{L \omega J}{r J}, \\ \operatorname{tg} \varphi &= \frac{L \omega}{r} \dots \dots \dots 5) \end{aligned}$$

Ferner können wir einen Ausdruck für den Strom als eine Funktion der induzierten elektromotorischen Kraft und der Konstanten des Stromkreises finden. Da ja das Dreieck $OE_r E$ rechtwinklig ist, so haben wir

$$E^2 = E_r^2 + E_s^2,$$

oder mit unseren früheren Bezeichnungen

$$E^2 = r^2 J^2 + L^2 \omega^2 J^2,$$

$$J = \frac{E}{\sqrt{r^2 + L^2 \omega^2}},$$

$$J = \frac{E}{r} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{L \omega}{r}\right)^2}} \dots \dots \dots 5a)$$

Wenn wir es mit einem Gleichstrome zu thun haben, so würde seine Gleichung $J = \frac{E}{r}$ lauten. Da nun der Ausdruck unter der Quadratwurzel unter allen Umständen grösser als Eins sein muss, so muss der Strom, welcher durch eine wechselnde elektromotorische Kraft hervorgebracht wird, stets kleiner sein als der Strom, welchen

eine gleich grosse, aber gleichgerichtete Kraft in demselben Stromkreise hervorbringen würde.

Den Ausdruck $\sqrt{r^2 + L^2 \omega^2}$ nennt man die »Impedanz« des Stromkreises und $L\omega$ seine »Induktanz«, nach Steinmetz »Reaktanz« (Anmerkung des Übersetzers). Als eine Hilfe für das Gedächtnis gebe ich in Fig. 9 Dr. Fleming's Diagramm wieder, in welchem diese Ausdrücke angegeben sind. Wir haben gesehen, dass das Ohm'sche Gesetz ohne weiteres nicht auf Wechselstromkreise anwendbar ist, dass dieses Gesetz aber angewendet werden darf, wenn wir die Impedanz für den Ohm'schen Widerstand einsetzen.

Ich habe jetzt noch die Bedeutung der Grösse zu erklären, welche wir L nannten und die wir einführten, um auf die Windungszahl der Spule und auf andere Eigenschaften des Stromkreises Rücksicht zu nehmen. Natürlich werden die meisten meiner Leser schon längst in diesem L den gewöhnlichen Selbstinduktionskoeffizienten erkannt haben; dennoch muss ich dies der Vollständigkeit halber beweisen. Es giebt verschiedene Erklärungen für den Selbstinduktionskoeffizienten, doch wird die folgende meinem Zwecke

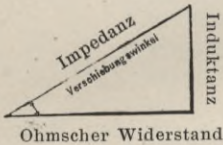


Fig. 9a.

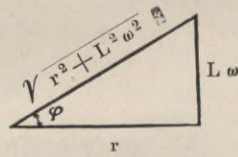


Fig. 9b.

am besten dienen: »Der Selbstinduktionskoeffizient ist das Verhältnis zwischen der elektromotorischen Gegenkraft in irgend einem Stromkreise und dem Zeitänderungsbetrage des Stromes, welcher die Gegenkraft hervorbringt«. Mathematisch lautet der Satz

$$L = \frac{e_s}{\frac{di}{dt}}$$

oder

$$e_s = L \frac{di}{dt} \dots \dots \dots 6)$$

oder wenn wir i aus Gleichung 1) einsetzen, so erhalten wir

$$e_s = L \frac{d(J \sin \omega t)}{dt},$$

$$e_s = L \omega J \cdot \cos \omega t \dots \dots \dots 2)$$

eine Gleichung, welche mit unserer Gleichung 2) identisch ist und zeigt, dass das L , welches wir damals einführten, thatsächlich der Selbstinduktionskoeffizient ist.

Kapitel II.

Messung der Spannung des Stromes und der Leistung.¹⁾

Als ich das letzte Experiment vorführte, hatte ich Gelegenheit, einen Spannungsmesser zu brauchen, und die Frage, welche wir jetzt aufwerfen, lautet: Welche Beziehung besteht zwischen der Ablesung des Instruments und der maximalen elektromotorischen Kraft in dem Stromkreise? Dass die Ablesung kleiner sein muss als das wahre Maximum, ist selbstverständlich, aber um wieviel kleiner?

Um diese Frage zu beantworten, können wir entweder die analytische oder die graphische Methode benutzen. Die erstere gebe ich im Anhang I dieses Kapitels und die letztere, welche von Herrn Blakesley herrührt, in Fig. 10. Ein Cardew-Spannungsmesser misst

nicht direkt die Spannung, sondern einfach den Betrag an Wärme, welcher pro Zeiteinheit in seinem Drahte entwickelt wird. Der Betrag an Wärme, welcher in irgend einem Augenblicke entwickelt wird, ist das Produkt aus dem augenblicklichen Strome und der augenblicklichen Spannung; da aber der durch den Draht fließende Strom der Spannung proportional ist, so ist der Betrag an entwickelter Wärme proportional dem Quadrate der augenblicklichen Spannung, das heisst proportional dem

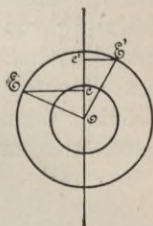


Fig. 10.

Quadrate von Oe in Fig. 10, wenn wir mit OE die Maximalspannung bezeichnen. Um nun die Gesamtwirkung einer grossen Zahl von aufeinanderfolgenden augenblicklichen Spannungswerten auf den Spannungsmesser zu finden, haben wir die Projektion Oe von OE für eine grosse Zahl von Lagen des Radius OE zu ziehen. Wir wollen diese Lagen paarweise annehmen, z. B. OE und OE' mit einem Winkelzwischenraum von 90 Grad. Augenscheinlich ist für ein solches Paar die Summe der Quadrate der Projektionen gleich

¹⁾ Leistung = $\frac{\text{Arbeit}}{\text{Zeit}}$ = Arbeit pro Sekunde = Effekt.

dem Quadrate der Maximalspannung; denn die rechtwinkligen Dreiecke OeE und $Oe'E'$ ergeben:

$$Oe^2 + Oe'^2 = OE^2 - Ee^2 + OE'^2 - E'e'^2,$$

ferner, da

$$\triangle Oe'E' \cong \triangle OeE,$$

so ist

$$OE' = OE$$

und

$$E'e' = Oe,$$

folglich

$$Oe^2 + Oe'^2 = OE^2 + OE^2 - (Ee^2 + Oe^2)$$

oder

$$Oe^2 + Oe'^2 = 2OE^2 - OE^2,$$

also

$$Oe^2 + Oe'^2 = OE^2;$$

schliesslich

$$\frac{Oe^2 + Oe'^2}{2} = \frac{OE^2}{2}.$$

Aus der letzten Gleichung erkennen wir, dass der Mittelwert der Quadrate der augenblicklichen Spannungen e und e' gleich dem halben Quadrate der Maximalspannung E ist. Dieser Wert ist von der wirklichen Lage jedes Paares unabhängig und ist deshalb der Durchschnittswert aller möglichen Paare. Die Spannung, welche am Cardew-Messer (oder an irgend einem anderen Instrument, dessen Wirkung von dem Quadrate der Spannung abhängt) abgelesen ist, muss deshalb mit der Quadratwurzel von 2 multipliziert werden, um die Maximalspannung zu erhalten, oder mathematisch ausgedrückt, wenn wir mit e_f die am Instrument abgelesene Spannung bezeichnen und mit E die Maximalspannung

$$e_f = \frac{E}{\sqrt{2}} = 0,707 E \quad 7)$$

Auf dem Pariser Kongress im Jahre 1889 hat man beschlossen, e_f die »effektive« Spannung zu nennen.

Dieselbe Überlegung, welche ich hier für die Spannungsmessung angewendet habe, kann auch für die Strommessung verwendet werden, vorausgesetzt, dass wir ein Messinstrument wählen, in dem der bewegliche Teil einer Kraft unterworfen ist, welche sich wie das Quadrat der Stromstärke ändert. Daher werden ein Siemens'sches Dynamometer, eine Thomson'sche Stromwage und ähnliche Instrumente die »effektive« Stromstärke

$$i_f = \frac{J}{\sqrt{2}} = 0,707 J \quad 8)$$

anzeigen.

Es ist wichtig, zu erwähnen, dass diese effektive Stromstärke (resp. die effektive Spannung) nicht etwa dasselbe ist wie die mittlere Stromstärke (resp. die mittlere Spannung). Um den Unterschied dieser beiden Grössen zu verstehen, wollen wir erst einmal festsetzen, was wir denn mittlere Stromstärke nennen. Wir stellen uns zu diesem Zwecke vor, ein Wechselstrom würde jedesmal, wenn er durch Null geht, kommutiert und der so erhaltene gleichgerichtete, aber pulsierende Strom würde durch einen elektrolytischen Apparat, z. B. durch ein Kupfervoltmeter, geleitet. Das Gewicht des pro Zeiteinheit niedergeschlagenen Kupfers ist dann ein Mass für die »mittlere Stromstärke« unseres pulsierenden Stromes. Die so erklärte mittlere Stromstärke, welche ich mit i_m bezeichnen will, ist ungefähr 90% der effektiven Stromstärke i_f , sodass wir die Ablesung der Siemenschen Dynamometer mit 0,9 multiplizieren müssen, um die wahre mittlere Stromstärke zu erhalten. Der Beweis hierfür ist im Anhang II dieses Kapitels gegeben.

Wir haben gesehen, dass die Spannungs- und Strommessung eine sehr einfache Sache ist; die Messung der Leistung jedoch, auf die wir jetzt unsere Aufmerksamkeit richten müssen, ist nicht ganz so einfach wie beim Gleichstrom. Wir wissen, dass, wenn wir die von einem Gleichstrom an einen Stromkreis abgegebene Leistung bestimmen wollen, wir nur die Stromstärke in Ampère und die Spannung in Volt zu beobachten und miteinander zu multiplizieren haben, um die Leistung in Watt zu erhalten. Wenn wir die Anzahl Watt durch 736 teilen, so erhalten wir das Resultat in Pferdestärken. Beim Wechselstrom ist dies nicht ganz so einfach, und wenn wir die Leistung in dieser Weise berechnen wollten, so würden unsere Resultate gewöhnlich zu gross und niemals zu klein werden. Der Grund liegt natürlich darin, dass der Augenblick der maximalen Stromstärke im allgemeinen nicht mit dem Augenblicke der maximalen Spannung zusammenfällt. Um die wahre Leistung zu erhalten, müssen wir das Produkt der augenblicklichen Spannungen und Stromstärken über eine vollständige Periode integrieren und dieses Integral durch die Zeit teilen, welche nötig ist, um eine ganze Periode zu vollenden. Die Sache ist im Anhang III dieses Kapitels analytisch behandelt, während ich sie hier graphisch behandeln werde, indem ich wieder die Methode des Herrn Blakesley benutze. In Fig. 11 stellen OE und OJ elektromotorische Kraft und Strom in irgend einem gegebenen Augenblicke dar, OE' und OJ' ihre Lage eine Viertelperiode später. Der Strom bleibt hinter der elektro-



Fig. 11.

motorischen Kraft um den Winkel φ zurück. Wenn ich für die Projektionen von E und J auf die Vertikale wieder kleine Buchstaben brauche, so ist der Mittelwert der Leistung für die beiden Längen natürlich $\frac{ei + e'i'}{2}$.

Aus dem Diagramm ergeben sich folgende Gleichungen:

$$\begin{aligned} ei &= EJ \sin a \sin \beta, \\ e'i' &= EJ \cos a \cos \beta. \end{aligned}$$

Vereinigen wir diese beiden Gleichungen in der Form $\frac{ei + e'i'}{2}$, so erhalten wir die mittlere Leistung, das heisst, die Arbeit pro Sekunde; weil sie in Watt gemessen wird, bezeichnen wir sie mit w und finden

$$\begin{aligned} w &= \frac{EJ}{2} (\cos a \cos \beta + \sin a \sin \beta), \\ w &= \frac{EJ}{2} \cos (a - \beta), \\ w &= \frac{EJ}{2} \cos \varphi 9) \end{aligned}$$

Dieser Wert ist der nämliche für jedes Paar, dessen Radien um 90 Grad in ihrer Lage voneinander abweichen; deshalb ist es der wahre Energiebetrag.

Da nun $e_f = \frac{E}{\sqrt{2}}$ und $i_f = \frac{J}{\sqrt{2}}$ ist, so können wir auch schreiben:

$$w = e_f \cdot i_f \cdot \cos \varphi 10)$$

wo e_f und i_f die Ablesungen in Volt und Ampère sind, wie wir sie von unseren gewöhnlichen Instrumenten erhalten.

Wir sehen daher, dass wir zuerst die »scheinbaren« Watt zu bestimmen haben, wie wenn wir es mit einem Gleichstrom zu thun hätten, und dass wir dann, um die wahren Watt zu finden, noch mit dem Cosinus des Phasenverschiebungswinkels multiplizieren müssen. Es ist jedoch nicht immer leicht, den Phasenverschiebungswinkel zu bestimmen, und um die Mühe und die möglichen Irrtümer bei einer solchen Bestimmung zu vermeiden, hat man verschiedene Instrumente für die direkte Effektmessung, die sogenannten Wattmeter, erfunden. Die bekannteste Form des Wattmeters ist ähnlich wie das Siemens'sche Dynamometer von der Firma Ganz & Co. konstruiert. Die feste Spule, welche wenige Windungen dicken Drahtes enthält, ist in Reihe mit dem Hauptstromkreise geschaltet, und die bewegliche oder aufgehängte Spule, welche aus vielen Windungen dünnen Drahtes besteht, ist als Nebenschluss zum Haupt-

stromkreise geschaltet. Ein induktionsloser Widerstand ist ausserdem noch in den Stromkreis der beweglichen Spule eingeschaltet, um die Selbstinduktion des Nebenschluss-Stromkreises herabzudrücken. (Über die Theorie des Wattmeters und die nötigen Korrekturen siehe Anhang II dieses Kapitels.)

Anhang I.

Der Spannungsmesser verbraucht in der unendlich kleinen Zeit dt eine Arbeit von $\frac{e^2}{r} dt$ Wattsekunden; mithin verbraucht er in der Zeit T , das heisst während einer vollen Periode,

$$\int_0^T \frac{e^2}{r} dt.$$

Den Arbeitsverbrauch pro Sekunde hatten wir W genannt; folglich ist der Arbeitsverbrauch in T Sekunden

$$WT = \int_0^T \frac{e^2}{r} dt.$$

Hierin ist

$$e = E \sin \omega t,$$

also

$$WT = \int_0^T \frac{E^2}{r} \sin^2 (\omega t) dt$$

oder

$$WT = \frac{1}{\omega} \cdot \frac{E^2}{r} \int_0^T \sin^2 (\omega t) d(\omega t);$$

durch Integration erhalten wir

$$WT = \frac{1}{\omega} \frac{E^2}{r} \left[\frac{1}{2} \omega t - \frac{1}{4} \sin 2 \omega t \right]_0^T$$

oder, wenn wir die Grenzen für t einsetzen,

$$WT = \frac{1}{\omega} \frac{E^2}{r} \left[\frac{1}{2} \omega T - \frac{1}{4} \sin 2 \omega T \right].$$

Allgemein ist

$$\omega = 2 \pi n$$

und

$$T = \frac{1}{n};$$

setzen wir diese Werte in das zweite Glied der Klammer ein, so wird

$$\frac{1}{4} \sin 2 \omega T = \frac{1}{4} \sin 2 \cdot 2\pi \cdot n \frac{1}{n}$$

oder

$$\frac{1}{4} \sin 2 \omega T = \frac{1}{4} \sin 4\pi = \frac{1}{4} \sin 720^\circ.$$

Da aber der Sinus von 720° gleich 0 ist, so ändert sich die Hauptgleichung in

$$WT = \frac{1}{\omega} \frac{E^2}{r} \cdot \frac{1}{2} \omega T$$

oder

$$W = \frac{1}{2} \frac{E^2}{r}.$$

Bezeichnen wir mit e_f wieder die effektive Spannung, so ist der Arbeitsverbrauch pro Sekunde

$$W = \frac{e_f^2}{r}.$$

Die beiden Gleichungen für W ergeben

$$\frac{1}{2} \frac{E^2}{r} = \frac{e_f^2}{r}$$

oder

$$e_f = \frac{E}{\sqrt{2}} = 0,707 E \quad 7)$$

Eine ganz analoge Betrachtung für den Ausdruck

$$\int_0^T i^2 r dt$$

ergibt

$$i_f = \frac{J}{\sqrt{2}} = 0,707 J \quad 8)$$

Anhang II.

Die mittlere Stromstärke, wie sie durch die Elektrolyse bestimmt wird, ist gleich der Anzahl Coulomb geteilt durch die Zeit, also:

$$i_m = \frac{1}{T} \int_0^T i dt.$$

Hierin ist

$$i = J \sin \omega t,$$

mithin

$$i_m = \frac{2}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} J \sin (\omega t) dt$$

oder

$$i_m = \frac{2}{T} \cdot \frac{J}{\omega} \int_0^{\frac{T}{2}} \sin (\omega t) d (\omega t).$$

Die Integration ergibt

$$i_m = \frac{2}{T} \cdot \frac{J}{\omega} \left[-\cos (\omega t) \right]_0^{\frac{T}{2}}$$

oder, wenn wir die Grenzen umkehren,

$$i_m = \frac{2}{T} \cdot \frac{J}{\omega} \left[\cos (\omega t) \right]_{\frac{T}{2}}^0$$

Setzen wir die Grenzen für t ein, so wird

$$i_m = \frac{2}{T} \cdot \frac{J}{\omega} \left[1 - \cos \omega \frac{T}{2} \right].$$

Da wieder

$$\omega = 2 \pi n$$

und

$$T = \frac{1}{n},$$

so wird das zweite Glied der Klammer

$$\cos 2 \pi n \frac{1}{2 n} \cos \pi = \cos 180^\circ.$$

Der Cosinus von 180° ist aber gleich -1 ; folglich ändert sich die Hauptgleichung in

$$i_m = \frac{2}{T} \frac{J}{\omega} \left[1 - (-1) \right]$$

$$i_m = \frac{2}{T} \cdot \frac{J}{\omega} \cdot 2.$$

Setzen wir für T und ω noch die bekannten Werte ein, so wird

$$i_m = \frac{2}{\frac{1}{n}} \cdot \frac{J}{2 \pi n} \cdot 2$$

$$i_m = \frac{J}{\frac{\pi}{2}} = 0,6366 J.$$

Der effektive Strom war

$$i_f = \frac{J}{\sqrt{2}} = 0,707 J;$$

folglich

$$\frac{i_m}{i_f} = \frac{\frac{J}{\pi}}{\frac{J}{\sqrt{2}}}$$

oder

$$\frac{i_m}{i_f} = \frac{0,6366}{0,707} = 0,9$$

oder

$$i_m = 0,9 i_f.$$

In derselben Weise ergibt sich

$$e_m = 0,9 e_f.$$

Anhang III.

Die vom Strome während einer Periode geleistete Arbeit ist nach Anhang I gleich WT ; folglich ist die pro Sekunde geleistete Arbeit

$$W = \frac{1}{T} \int_0^T e i dt.$$

Die Werte von e und i finden wir aus Fig. 11, und zwar

$$e = E \sin \alpha$$

$$i = J \sin \beta = \sin (\alpha + \varphi).$$

Setzen wir diese in die Gleichung von W ein, so wird

$$W = \frac{1}{T} \int_0^T E \sin \alpha \cdot J \sin (\alpha + \varphi) dt$$

oder

$$W = \frac{E J}{\omega T} \int_0^T \sin \alpha \cdot \sin (\alpha + \varphi) d(\omega t).$$

In dieser Gleichung ist

$$\omega t = \alpha;$$

führen wir nun statt t die Integrationsveränderliche α ein, so müssen

wir auch statt 0 und T die Grenzen 0 und 2π einführen. Wir erhalten mithin

$$W = \frac{EJ}{\omega T} \int_0^{2\pi} \sin a \cdot \sin (a + \varphi) da$$

oder, wenn wir $\sin (a + \varphi)$ auflösen,

$$W = \frac{EJ}{\omega T} \int_0^{2\pi} (\cos \varphi \sin^2 a da + \sin \varphi \sin a \cos a da).$$

Die Integration ergibt dann

$$W = \frac{EJ}{\omega T} \left[\cos \varphi \left(\frac{1}{2} a - \frac{1}{4} \sin 2a \right) + \sin \varphi \left(-\frac{1}{4} \cos 2a \right) \right]_0^{2\pi}$$

oder

$$W = \frac{EJ}{\omega T} \left[\cos \varphi \left(\frac{2\pi}{2} - \frac{1}{4} \sin 2 \cdot 2\pi \right) - \sin \varphi \left(\frac{1}{4} \cos 2 \cdot 2\pi - \frac{1}{4} \cdot 1 \right) \right]$$

Hierin ist

$$\sin 2 \cdot 2\pi = \sin 720^\circ = 0$$

und

$$\cos 2 \cdot 2\pi = \cos 720^\circ = 1,$$

also wird

$$W = \frac{EJ}{\omega T} \left[\cos \varphi (\pi - 0) - \sin \varphi \left(\frac{1}{4} - \frac{1}{4} \right) \right]$$

oder

$$W = \frac{EJ}{\omega T} \cos \varphi \cdot \pi.$$

Allgemein gilt wieder

$$\omega = 2\pi n,$$

$$T = \frac{1}{n};$$

mithin wird

$$W = \frac{EJ}{2\pi n \cdot \frac{1}{n}} \cos \varphi \cdot n$$

oder

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

Da schliesslich

$$e_f = \frac{E}{\sqrt{2}},$$

und

$$i_f = \frac{J}{\sqrt{2}},$$

so wird

$$W = e_f \cdot i_f \cdot \cos \varphi.$$

Anhang IV.

Es möge der Phasenverschiebungswinkel in dem Stromkreise, dessen Arbeit wir messen wollen, gleich φ und der Phasenverschiebungswinkel in der dünnadrächtigen Spule des Wattmeters, welcher von der Selbstinduktion dieser Spule abhängt, gleich δ sein. Ferner möge J_f der effektive Strom in der dickadrächtigen Spule und i_f der effektive Strom in der dünnadrächtigen Spule sein; dann würde die vom Wattmeter angezeigte Leistung für den Fall, dass die Ströme konstant wären, gleich $K r i_f \cdot J_f$ sein, wo K der Koeffizient des Instruments und r der Widerstand der dünnadrächtigen Spule ist. Die wahre Leistung des Wechselstromes von der effektiven Spannung E_f ist aber

$$W = E_f \cdot J_f \cdot \cos \varphi.$$

Die vom Instrument angezeigte Leistung ist dagegen

$$W' = K \cdot \text{Ableseung}$$

oder

$$W' = K \cdot r i_f \cos (\varphi - \delta) \cdot J_f;$$

hierin ist

$$r i_f = E_f \cos \delta,$$

mithin

$$W' = K \cdot E_f \cos \delta \cos (\varphi - \delta) \cdot J_f.$$

Das Verhältnis der wahren Leistung W zu der vom Instrument angezeigten Leistung W' ist demnach

$$\frac{W}{W'} = \frac{E_f \cdot J_f \cos \varphi}{K \cdot E_f \cdot J_f \cos \delta \cdot \cos (\varphi - \delta)}$$

oder

$$W = \frac{W'}{K} \cdot \frac{\cos \varphi}{\cos \delta \cdot \cos (\varphi - \delta)}.$$

Hierin bedeutet nach obiger Gleichung für W'

$$\frac{W'}{K} \text{ die Ablesung;}$$

folglich ist

$$W = \text{Ablesung} \cdot \frac{\cos \varphi}{\cos \delta \cos (\varphi - \delta)'},$$

das heisst, wir müssen unsere Ablesung am Instrument noch mit

$$\frac{\cos \varphi}{\cos \delta \cos (\varphi - \delta)}$$

multiplizieren, um aus den abgelesenen die wahren Watt zu erhalten.

Den genannten Faktor können wir in folgender Weise umwandeln:

$$\frac{\cos \varphi}{\cos \delta \cos (\varphi - \delta)} = \frac{\cos \varphi}{\cos \delta [\cos \varphi \cos \delta + \sin \varphi \sin \delta]},$$

$$\frac{1}{\cos \delta [\cos \delta + \operatorname{tg} \varphi \sin \delta]} = \frac{1}{\cos^2 \delta} \cdot \frac{1}{1 + \operatorname{tg} \varphi \operatorname{tg} \delta}$$

und da

$$\frac{1}{\cos^2 \delta} = 1 + \operatorname{tg}^2 \delta,$$

so wird schliesslich

$$\frac{\cos \varphi}{\cos \delta \cos (\varphi - \delta)} = \frac{1 + \operatorname{tg}^2 \delta}{1 + \operatorname{tg} \delta \cdot \operatorname{tg} \varphi}.$$

Diese Gleichung wollen wir jetzt für zwei besondere Fälle betrachten.

Für den Fall, dass $\delta = 0$ ist, wird

$$\frac{\cos \varphi}{\cos \delta \cos (\varphi - \delta)} = 1;$$

das heisst, wenn das Wattmeter keine Selbstinduktion besitzt, fällt das Korrektionsglied fort.

Ferner für den Fall, dass $\delta = \varphi$ ist, wird ebenfalls

$$\frac{\cos \varphi}{\cos \delta \cos (\varphi - \delta)} = 1;$$

das heisst, wenn die Selbstinduktion des Wattmeters gleich der Selbstinduktion des zu messenden Stromkreises ist, so fällt das Korrektionsglied ebenfalls fort.

In allen übrigen Fällen aber muss die oben angegebene Korrektion ausgeführt werden.



Kapitel III.

Bedingung für die Maximalleistung.

Es ist von Wichtigkeit, die Bedingungen zu untersuchen, unter denen wir eine Maximalleistung in einem gegebenen Stromkreise erzielen können. Dies ist die Ableitung für die schon früher besprochenen Verhältnisse, da dieselbe naturgemäss aus der Untersuchung des in Fig. 6 dargestellten Falles hervorgeht. Wir haben eine Wechselstrommaschine, einen Widerstand mit Selbstinduktion und eine Reihe Glühlampen. Die Selbstinduktion können wir nicht vermindern und die Maschinenspannung können wir nicht erhöhen. Wie müssen wir also unsere Lampen einrichten, um eine Maximalarbeit in sie hineinzuschicken und deshalb ein Maximum an Licht aus ihnen zu erhalten? Ohne uns in eine langwierige mathematische Untersuchung einzulassen, können wir sogleich erkennen, dass der Ohm'sche Widerstand der Glühlampenreihe wesentlich mit dem Betrage an nützlich verwendeter Energie zu thun hat. Wenn der Widerstand sehr gross ist, so werden die Lampen beinahe die ganze Maschinenspannung erhalten, aber dann wird der Strom gering sein. Wenn wir anderseits den Widerstand zu sehr verringern in unserem Bestreben, einen starken Strom zu erhalten, so werden wir fast die ganze Spannung zu opfern haben, da ja die Selbstinduktion, welche jetzt durch einen starken Strom genährt wird, den grössten Teil der nutzbaren Spannung verschlingen wird. Wir sehen, dass sowohl zu wenig als zu viel Widerstand schädlich ist; wir haben daher denjenigen Widerstand zu finden, welcher uns die beste Wirkung ergeben wird. Dies wird der Fall sein, wenn die Spannung an den Lampen gleich der elektromotorischen Kraft der Selbstinduktion ist, während beide ungefähr 70% der Maschinenspannung betragen. Ich gebe den analytischen Beweis in einem Anhange zu diesem Kapitel und den graphischen Beweis vermittelt des Vektordiagramms (Fig. 12). In dieser Figur möge der Radius des Kreises die gegebene Maschinenspannung und OE_s die dem Strome OJ entsprechende

elektromotorische Kraft der Selbstinduktion sein. Dann ist die Tangente des Winkels bei J gleich $L\omega$; denn nach der Gleichung 3) ist

$$E_s = L\omega \cdot J,$$

ausserdem ergibt das rechtwinklige Dreieck $E_s O J$ in Fig. 12:

$$E_s = J \cdot \operatorname{tg} \delta,$$

folglich

$$\operatorname{tg} \delta = L\omega.$$

Die an die Lampen abgegebene Energie ist nach Gleichung 9):

$$W = \frac{J E}{2} \cos \varphi$$

oder, graphisch ausgedrückt, gleich der Projektion $E \cdot \cos \varphi$ des Spannungsradius E auf den Stromradius J , multipliziert mit dem Strom J und geteilt durch 2. Die Projektion der Maschinenspannung OE giebt uns aber die Lampenspannung E_r ; ferner ist der Strom proportional der elektromotorischen Kraft der Selbstinduktion (siehe Dreieck $O J E_s$), sodass wir auch sagen können, die Energie ist proportional dem Produkt aus der Lampenspannung E_r und der elektromotorischen Kraft der Selbstinduktion E_s , das heisst proportional der in Fig. 12 schraffierte Fläche. Mithin können wir unsere Aufgabe auch folgendermassen ausdrücken:

Es ist diejenige Lage von OE zu finden, für welche die schraffierte Fläche ein Maximum wird. Natürlich wird dies der Fall sein, wenn die Gerade OE einen Winkel von 45 Grad mit der Horizontalen bildet; mit anderen Worten, wenn der Strom um ein Achtel einer Periode hinter der induzierten elektromotorischen Kraft, das heisst der Maschinenspannung E , zurückbleibt und wenn die elektromotorische Kraft der Selbstinduktion gleich der Lampenspannung ist. Diese Bedingung wird erfüllt sein, wenn der Widerstand der Glühlampenreihe

$$r = L\omega$$

ist.

Um die Erklärung zu vereinfachen, habe ich angenommen, dass in Fig. 6 der Widerstand, die Selbstinduktion und der Sitz oder die Quelle der elektromotorischen Kraft verschiedene und getrennte Teile des Stromkreises sind. Dies war jedoch nicht wesentlich. Wir könnten z. B. annehmen, dass die Selbstinduktion einen Teil der Maschine oder selbst der Lampenreihe bildete, und dennoch würde unser Resultat das nämliche bleiben. Ja noch mehr. Angenommen,

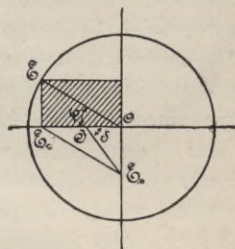


Fig. 12.

wir nähmen die Lampen fort und schalteten an ihrer Stelle eine Seriendynamo mit gut unterteilten Feldmagneten ein. Welchen Weg auch immer der Strom durch die Maschine geschickt wird, sie wird sich immer in derselben Richtung drehen, und der Wechselstrom muss sie deshalb in Bewegung setzen. Nun denken wir uns die Periode des Stromes sehr lang, und zwar so lang, dass die elektromotorische Kraft der Selbstinduktion in den Magnetwickelungen und im Anker vernachlässigt werden kann. Dann ist das einzige, was sich dem Strome in seinem Laufe durch den Anker entgegensetzt, die von dem Anker entwickelte elektromotorische Gegenkraft, welche bei konstanter Tourenzahl der Feldstärke proportional ist. Wenn wir nun die Magnete nicht stark erregen (und wegen der Hysterisis und anderer Verluste ist es ratsam, mit niedrigerer Induktion zu arbeiten), so können wir die Feldstärke als dem Strome proportional betrachten, sodass der einzige Widerstand, welcher sich dem Strome widersetzt, proportional der Stromstärke ist. Es wird thatsächlich dieselbe Art des Widerstandes sein, wie er durch den Ohm'schen Widerstand hervorgebracht wird, nur mit dem Unterschiede, dass wir, anstatt die elektrische Energie in Wärme zu verwandeln, sie in mechanische Arbeit umsetzen, welche von der Welle des Motors abgenommen werden kann. So weit wird der Motor, obgleich er mit einem Wechselstrome von sehr langer Periode gespeist wird, genau in der Weise arbeiten, wie wenn er mit einem Gleichstrome verbunden wäre. Jetzt aber wollen wir die Frequenz des Stromes erhöhen, das heisst, wir wollen die Dauer einer Periode abkürzen und mehr und mehr Stromwellen pro Sekunde haben. Hierdurch wird zu der elektromotorischen Gegenkraft des Motors (welche nützlich ist, weil sie von der Ausgabe mechanischer Arbeit begleitet ist) noch eine zweite elektromotorische Kraft, nämlich die elektromotorische Kraft der Selbstinduktion, hinzukommen. Diese muss natürlich die von dem Motor verausgabte Arbeit verringern, erstens, weil die Stromstärke durch die Wirkung der Selbstinduktion verringert ist, und zweitens, weil mit der elektromotorischen Kraft der Selbstinduktion, welche jetzt eine bedeutende Grösse angenommen hat, ein beträchtliches Zurückbleiben des Stromes hinter der Maschinen-spannung eintritt. Vor einigen Jahren stellte ich Versuche mit einem derartigen Motor an und fand, dass die von der Maschine verausgabte Arbeit, wenn sie in einem Wechselstrom eingeschaltet war, nur ungefähr ein Sechstel seiner normalen Arbeit in einem Gleichstrome war. In diesem Motor war die Selbstinduktion zu gross im Vergleich zu seiner elektromotorischen Gegenkraft. Nach unserer Regel hätte die elektromotorische Kraft der Selbstinduktion gleich der elektromotorischen Gegenkraft sein sollen. In diesem Falle

würde der Motor ungefähr 70 % der Arbeit abgeben, welche er in einem Gleichstrom entwickeln könnte. Wenn es möglich wäre, Motoren zu konstruieren, welche die eben genannte Bedingung erfüllten, so würde es eine sehr leichte und praktische Lösung der Aufgabe sein, wie man die bestehenden Lichtstationen, welche Wechselstrom liefern, auch zur Arbeitsverteilung (fälschlich meistens Kraftübertragung genannt) verwenden könnte; ich bezweifle jedoch die Möglichkeit, dass sich die Aufgabe in dieser Weise lösen lässt. Die Selbstinduktion eines solchen Motors muss immer ausserordentlich hoch sein, aber ein Weg, auf dem wir uns wenigstens der besten Arbeitsbedingung nähern können, ist der, die Frequenz zu erniedrigen und die Tourenzahl des Motors zu erhöhen. Ich habe mich eine Zeit lang mit dieser Arbeitsmethode von Wechselstrommotoren beschäftigt, weil sie bereits praktische Bedeutung erlangt hat, jedoch nicht in Betreff des regelrechten Arbeitens, sondern in Betreff des Angehens dieser Maschinen. Der Ganz'sche Motor geht ohne Belastung an, wie wenn er eine gewöhnliche Gleichstrommaschine wäre, und nachdem er eine gewisse Geschwindigkeit erreicht hat, beginnt er als Wechselstrommaschine zu arbeiten. Wenn sich der Motor in diesem Zustand befindet, so kann die Belastung aufgeworfen werden, und die Maschine wird sogar einen gewissen Betrag von Überlastung aushalten können.

Anhang.

Die pro Sekunde geleistete Arbeit ist

$$W = \frac{E J}{2} \cos \varphi$$

oder wenn wir für $\cos \varphi$ den Wert

$$\frac{r}{\sqrt{r^2 + L^2 \omega^2}}$$

und für J den Wert

$$\frac{E}{\sqrt{r^2 + L^2 \omega^2}}$$

einsetzen, so haben wir

$$W = \frac{E^2}{2} \frac{r}{r^2 + L^2 \omega^2}$$

oder

$$W = \frac{E^2}{2} \frac{1}{r + \frac{L^2 \omega^2}{r}}$$

Die Variable in dieser Gleichung ist der Widerstand r , und um zu finden, für welchen Wert von r die Arbeit W ein Maximum wird, lösen wir die Gleichung $\frac{dW}{dr} = 0$ und finden

$$\frac{dW}{dr} = \frac{E^2}{2} \cdot \frac{-1 \left(1 - \frac{L^2 \omega^2}{r^2}\right)}{\left(r + \frac{L^2 \omega^2}{r^2}\right)} = 0,$$

mithin

$$-1 \left(1 - \frac{L^2 \omega^2}{r^2}\right) = 0,$$

oder

$$-1 + \frac{L^2 \omega^2}{r^2} = 0,$$

also

$$r = L\omega.$$

Der Maximalwert von W wird dann

$$W = \frac{E^2}{2} \frac{1}{L\omega + \frac{L^2 \omega^2}{L\omega}}$$

oder

$$W = \frac{E^2}{2} \frac{1}{2L\omega} = \frac{E^2}{4} \frac{1}{L\omega}$$

oder schliesslich

$$W = \frac{1}{4} \frac{E^2}{r}.$$

Bezeichnen wir wieder mit e_f die effektive Spannung, wie sie z. B. von einem Cardew-Spannungsmesser angegeben wird, so ist

$$W = \frac{1}{2} \frac{E^2}{2} \frac{1}{r} = \frac{e_f^2}{2r}.$$

Die Analogie mit der wohlbekannten Regel für die Maximalleistung einer Gleichstromquelle ist bemerkenswert. Gemäss dieser Regel wird die Maximalleistung in dem äusseren Stromkreise entwickelt, wenn sein Widerstand gleich dem Widerstande der Batterie oder der Maschine ist, welche den Strom erzeugt. Wenn E die elektromotorische Kraft der Batterie und r ihr innerer Widerstand ist, so ist die Maximalleistung, welche in einem äusseren Stromkreise von gleichem Widerstande erhalten werden kann,

$$W = \frac{1}{4} \frac{E^2}{r},$$

genau derselbe Ausdruck, wie wir ihn oben für Wechselströme erhalten haben.

Kapitel IV.

Wechselstrommaschinen.

Als ich die elektromotorische Kraft der Selbstinduktion besprach, haben wir gesehen, dass dieselbe hervorgebracht wird durch die Änderung in der totalen Induktion, welche den elektrischen Stromkreis passiert, oder, was auf dasselbe hinauskommt, dadurch, dass die Drahtwindungen magnetische Kraftlinien schneiden. In einer (Wechselstrom-) Erregerspule ändert sich die Magnetisierung, und wir erhalten deshalb eine elektromotorische Kraft, ohne nötig zu haben,

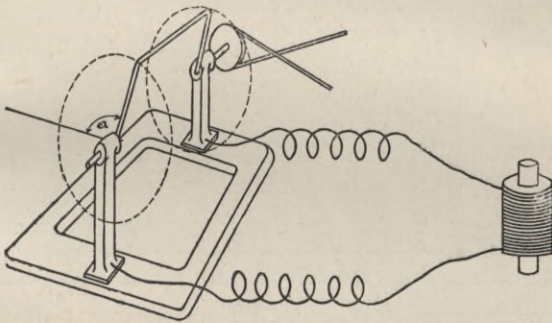


Fig. 13.

den Draht zu bewegen; wenn dagegen die Feldstärke konstant ist und ihre Lage im Raume dieselbe bleibt, so müssen wir den Draht bewegen, um eine elektromotorische Kraft zu erhalten, und dies ist genau derselbe Vorgang, den wir in unseren Wechselstromdynamos ausführen. Die am leichtesten verständliche Form einer Wechselstrommaschine zeigt Fig. 13. Hier machen wir Gebrauch von der Vertikalkomponente des erdmagnetischen Feldes, und zwar ist die elektromotorische Kraft ein Maximum, wenn sich der Draht entweder in seiner höchsten oder in seiner niedrigsten Stellung (also

bei vertikaler Kurbel) befindet; dagegen ist sie gleich Null, wenn der Draht sich in der äussersten rechten oder linken Stellung (also bei horizontaler Kurbel) befindet. Der Apparat, welcher in Fig. 13 dargestellt wird, ist thatsächlich nur ein mechanisches Modell des Vektordiagramms. In dieser Figur sind die Lager und Lagerböcke so dargestellt, als ob sie die Klemmen der Maschine bildeten; an ihnen sind Drähte befestigt, und diese führen zu einem Solenoid-Elektromagneten, sodass sie auf den letzteren einwirken können. Vorausgesetzt, dass die Feldstärke gross genug wäre, so könnten wir, wenn die Kurbel durch Schnur und Rolle schnell in Drehung versetzt würde, mit dem Elektromagneten die Wirkungen hervorbringen, welche ich gezeigt habe, als die Spule mit einem Transformator verbunden war. Aber die von der Erde gelieferte Feldstärke ist bei weitem nicht hinreichend. Wir müssen deshalb zu einem künstlichen Felde, welches von Elektromagneten erzeugt wird, unsere Zuflucht nehmen, so wie es z. B. in Fig. 14 gezeigt ist, wo NS

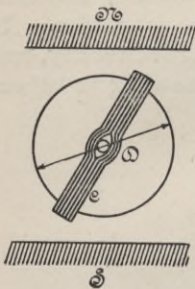


Fig. 14.

die Polflächen von zwei Elektromagneten sind, zwischen denen sich die Spule C dreht. Wenn sich die Polflächen einige Entfernung über den Durchmesser D der Spule ausdehnen, so können wir annehmen, dass das Feld innerhalb des von der Spule durchstrichenen Raumes gleichförmig ist; dann wird die Anzahl Kraftlinien oder die totale Induktion, welche in irgend einem Augenblicke durch die Spule geht, dem Sinus des Winkels proportional sein, den die Spule mit der Vertikalen bildet. Die elektromotorische Kraft wird dann proportional dem Sinus des Winkels sein, den die Spule mit der Horizontalen bildet.

Wenn wir H die Feldintensität, das heisst die Anzahl Kraftlinien pro Quadratcentimeter der senkrecht zur Kraftlinienrichtung stehenden Querschnittsfläche, also hier der Polfläche, l die Länge der Spule, v die Geschwindigkeit und m die Zahl der Drähte (auf beiden Seiten der Spule gezählt) nennen, so wird die maximale elektromotorische Kraft in C.G.S.-Mass für die vertikale Stellung der Spule gleich

$$m \cdot H l v$$

sein.

Man pflegt anstatt H, das heisst, nstatt der Anzahl Kraftlinien pro Quadratcentimeter, die totale Induktion F, welche durch die Spule geht, in die Rechnung einzuführen und anstatt der linearen Geschwindigkeit die Anzahl Umdrehungen pro Sekunde, welche in diesem Falle, wo wir es mit einer zweipoligen Maschine zu thun

haben, gleich der Frequenz n^1) ist. Eine einfache algebraische Umformung, welche nicht ausgeführt zu werden braucht, ergibt uns nun die folgende Formel für die maximale elektromotorische Kraft:

$$E = 2 \pi n F \cdot \frac{m}{2} = \pi n F m.$$

Die effektive elektromotorische Kraft erhalten wir, wenn wir diesen Ausdruck durch die Quadratwurzel aus zwei teilen, und wenn wir die elektromotorische Kraft in Volt haben wollen, so multiplizieren wir noch mit 10^{-8} oder in Buchstaben:

$$e_f = \frac{\pi n F m}{\sqrt{2}} 10^{-8},$$

$$e_f = 2,22 n F m \cdot 10^{-8} 11)$$

Wir wollen jetzt annehmen, wir entfernten den in Fig. 14 gezeichneten Anker, und ersetzen ihn durch einen solchen, der für Gleichstrom gewickelt ist. Wir brauchen dieselbe totale Drahtlänge, aber verteilen die Windungen gleichmässig über den Kreis und führen sie an einen Kollektor (oder richtiger Kommutator). Wie wir wissen, wird dann die elektromotorische Kraft dieser Maschine

$$e = n F m \cdot 10^{-8}$$

sein.

Der Strom durchfließt aber den Anker in zwei parallelen Stromkreisen, nämlich in den beiden Ankerhälften, die durch die Bürsten parallel geschaltet werden; wenn wir demnach dieselbe Stromdichte wie für den Wechselstrom in den Ankerdrähten zulassen, so werden wir einen Gleichstrom von der doppelten Stärke des Wechselstromes erhalten. Andererseits wird der Wechselstrom die 2,22fache Spannung des Gleichstromes haben, sodass die Leistung der Wechselstrommaschine um $\frac{2,22}{2} = 1,11$ oder um 11 % grösser sein wird als die der Gleichstrommaschine. Bei der Wechselstromdynamo sparen wir ausserdem den Kollektor, und wir sehen daher, dass für gleiche Leistung die Wechselstromdynamo leichter und billiger ist als die Gleichstromdynamo.

Die in Fig. 14 gezeichnete Maschine ist jedoch nicht von der Art, wie sie in der Praxis gebraucht werden. Ich habe sie nur als ein einfaches Beispiel gewählt, um die Beziehung zwischen Gleichstrom- und Wechselstrommaschinen zu zeigen. In Wirklichkeit werden die letzteren mit einer ganzen Anzahl von Polen ausgeführt,

¹⁾ Frequenz = Anzahl Perioden pro Sekunde; Periode = 2 Wechsel = Positive + negative Welle. (Anm. d. Übersetzers.)

um die Tourenzahl auf vernünftige Grenzen herunterzubringen, und der Draht wird nicht in Bündel zusammengebunden, sondern mehr oder weniger über die Oberfläche des Ankers verteilt. Ausserdem besteht noch der Unterschied, dass die Pole der Feldmagnete den Anker enger umschliessen; infolgedessen ist der Übergang von einem Nordpole zu einem Südpole abgerissener und plötzlicher als in Fig. 14. Trotz dieser Unterschiede ist die elektromotorische Kraft der Wechselstrommaschinen, wie sie praktisch ausgeführt werden, fast gleich der in Formel (11) gegebenen, und der Vergleich in Bezug auf Gewicht und Kosten, den wir soeben fanden, passt hinreichend für die Maschinen, wie sie gegenwärtig gebaut werden.

Wir erkennen aus dem Diagramm in Fig. 14, dass die Wechselstrommaschinen alle durch zwei Hauptzüge charakterisiert sind; sie bestehen nämlich aus einem Kranze oder Ringe von Magnetpolen und einem Ringe von Ankerspulen, von denen entweder beide oder nur einer von beiden beweglich ist. Die besondere Gestalt der Pole, ihre mechanische Anordnung, die Art, wie die Ankerspulen gewunden werden, und viele andere Einzelheiten können mannigfach geändert sein, aber die Hauptzüge bleiben dieselben.

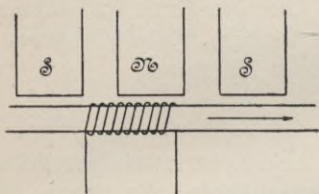


Fig. 15.

Für Zwecke des Studiums der Maschinen pflegt man sich vorzustellen, dass der Polring und der Ankerring aufgeschnitten und in geraden Linien ausgebreitet sind. Wir brauchen dann nur eine Spule und zwei oder drei Pole, wie in Fig. 15 gezeichnet, zu betrachten. Die elektromotorische Kraft in irgend einem Augenblicke ist natürlich der Anzahl Drähte proportional, welche in diesem Augenblicke gerade von einem oder beiden Polen bedeckt werden, wobei man jedoch im letzteren Falle darauf Rücksicht nehmen muss, die Differenz in der Zahl der Drähte zu zählen, da ja die Pole verschieden wirken. Wir können deshalb eine Kurve aufzeichnen, welche die resultierende elektromotorische Kraft als eine Funktion der Lage der Spule vor den Polen ergibt, und da sich ja diese Lage bei konstanter Tourenzahl proportional mit der Zeit ändert, so giebt uns die Kurve die elektromotorische Kraft auch als Funktion der Zeit. Nun können wir leicht erkennen, dass die Gestalt dieser Kurve von der Breite der Pole und der Länge der Spule abhängt. Sie hängt auch von der relativen Gestalt dieser beiden ab. Um aber unsere Untersuchung nicht zu sehr zu komplizieren, nehme ich an, dass sowohl die Pole wie die Spulen rechtwinklig sind, was bei den Maschinen der Westinghouse- und der Lowrie Hall-Type genau

und bei den meisten anderen Maschinen annähernd der Wahrheit entspricht. Als extremen Fall, was die Polbreite anbetrifft, wollen wir eine Maschine annehmen, bei der die Nord- und Südpole so nahe aneinander gebracht sind, dass sie sich fast berühren. In diesem Falle ist die Breite der Pole gleich ihrer Entfernung (von Mitte bis Mitte Pol gemessen). Maschinen mit wechselnden Polen, die so nahe aneinander gesetzt sind, werden allerdings nicht gebaut; aber die Mordey-Dynamo, in welcher Pole desselben Vorzeichens durch gleich grosse Intervalle von leeren oder neutralen Zwischenräumen getrennt sind, ist eine praktische Illustration des nämlichen Prinzips. Angenommen nun, wir brächten in ein solches Feld einen Anker, dessen ganze Oberfläche mit Windungen bedeckt ist; dann muss auch die Länge jeder Spule der Polbreite gleich sein, und es wird deshalb nur eine einzige Lage geben, nämlich diejenige, in

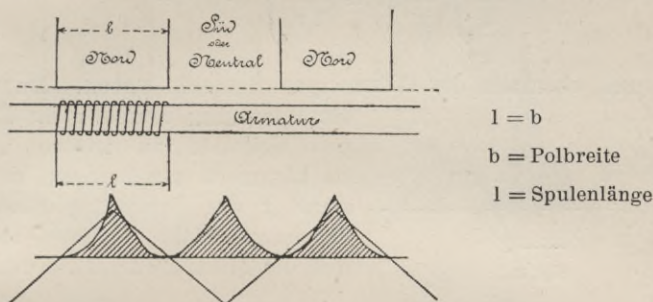


Fig. 16.

welcher die Mitte der Spule mit der Mitte des Poles zusammenfällt, wo alle Drähte in der Spule elektromotorische Kraft von gleicher Richtung erzeugen. In jeder anderen Lage ist die elektromotorische Kraft in dem einen Teile der Spule entgegengesetzt zu der in dem anderen Teile. In einer derartigen Maschine wird aber der Draht nicht in der vorteilhaftesten Weise ausgenutzt, und die Kurve der elektromotorischen Kraft wird eine Zickzacklinie, wie Fig. 16 zeigt. Die Frage, welche uns am meisten interessiert, ist die nach der effektiven elektromotorischen Kraft dieser Kurve. Durch den Versuch können wir sie natürlich leicht bestimmen. Wir brauchen nur einen Cardew-Spannungsmesser an die Enden der Spule zu legen und die Spannung abzulesen; es ist jedoch wichtig, schon im voraus, das heisst, ehe die Maschine gebaut ist, zu wissen, wieviele Volt wir aus derselben erhalten können. Wir wollen uns deshalb einmal klar machen, was denn der Spannungsmesser eigentlich misst. In Wirklichkeit misst er den Betrag an Wärme, welche pro Sekunde

in seinem Drahte entwickelt wird. Bei den schnellen Wechsell, welche die Maschine hervorbringt, hat der Draht keine Zeit, seine Temperatur zu ändern, und sein Widerstand ist deshalb konstant. Der Betrag an Wärme, welche pro Sekunde ausgestrahlt wird, ist dann das Quadrat der effektiven Spannung, dividiert durch den Widerstand. Dieser Ausdruck ist auch gleich dem Integral des Quadrates der augenblicklichen Spannung, multipliziert mit dem Differential der Zeit, wenn wir die Integration über eine Sekunde ausdehnen und das erhaltene Integral durch den (konstanten) Widerstand dividieren. Anstatt über eine Sekunde können wir natürlich auch über die Zeitdauer einer halben Periode integrieren, müssen dann aber das Resultat durch diese Zeit dividieren; dieser Ausdruck

$$\frac{1}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} \frac{e^2}{r} dt = \frac{2}{Tr} \int_0^{\frac{T}{2}} e^2 dt = \frac{e_f^2}{r}$$

wird uns ebenfalls die Wärme pro Sekunde geben. Da wir aber die Spannung e_f und nicht die Wärme pro Sekunde zu wissen wünschen, so kümmern wir uns um den Widerstand r des Spannungsmesserdrahtes überhaupt nicht, sondern ziehen einfach die Quadratwurzel aus dem Integral

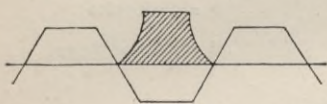


Fig. 17.

$$\frac{1}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} e^2 dt = \frac{2}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} e^2 dt = e_f^2.$$

Wie unsere Gleichung zeigt, ergibt diese Quadratwurzel die effektive Spannung e_f . Um dieses auf graphischem Wege, wie es Fig. 16 zeigt, auszuführen, müssen wir die Ordinaten der Spannungskurve in Fig. 16 abmessen, dieselben quadrieren und das Resultat in einem willkürlichen Massstabe auftragen. Auf diese Weise erhalten wir die zeltartige schraffierte Figur in dem Diagramm der Fig. 16; die Fläche derselben ist das Integral und, um ganz korrekt zu sein, proportional dem Integral des Quadrates der augenblicklichen Spannung und Zeit. Die Höhe eines Rechtekes von gleicher Grundlinie und Fläche ist das Quadrat der effektiven Spannung e_f . So ist es möglich, für irgend eine gegebene Anordnung der Feldpole und der Armaturspulen im voraus zu bestimmen, wie gross die effektive Spannung sein wird, und kurz gesagt, die Spannung der Maschine wird um so höher sein, je grösser die schraffierte Fläche

ist. In Fig. 17 z. B. habe ich angenommen, dass das Magnetfeld von Fig. 16 beibehalten worden ist, dass aber die Armaturspulen nur halb so lang für dieselbe Windungszahl gemacht worden sind. Jetzt ist nur die halbe Ankeroberfläche mit Draht bedeckt, und die maximale elektromotorische Kraft wird eine Viertelperiode lang aufrecht erhalten, anstatt wie vorher nur einen Augenblick zu dauern. Diese Anordnung ergibt eine trapezförmige Linie für die Kurve der elektromotorischen Kraft, und die schraffierte Fläche ist jetzt beträchtlich grösser als vorher. Wir wollen nun zu dem ersten, voll bewickelten Anker zurückkehren und ihn in einem Felde laufen lassen, dessen Pole nur die halbe Breite von vorhin haben, dessen totale Induktion jedoch dieselbe geblieben ist. Hier (siehe Fig. 18) erhalten wir wieder eine trapezförmige Kurve für die elektromotorische Kraft und dieselbe effektive Spannung wie in Fig. 17. Wenn wir

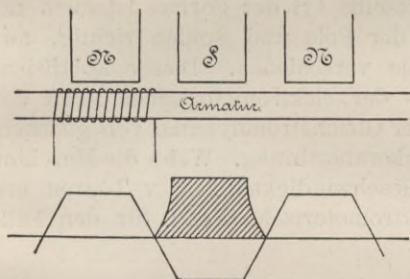


Fig. 18.

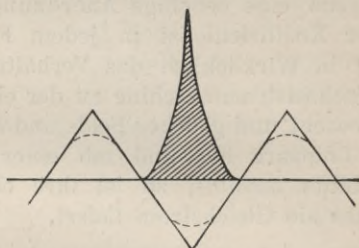


Fig. 19.

jetzt die Spulen verkürzen, so kommen wir zu den Zickzacklinien zurück, aber die Spitzen sind höher (siehe Fig. 19), und die effektive Spannung ist, entsprechend der schraffierten Fläche, wieder erhöht. Die in Fig. 19 veranschaulichte Anordnung ist diejenige, wie sie in den jetzigen Wechselstrommaschinen getroffen wird; aber entsprechend der Kraftlinienstreuung an den Ecken der Polstücke ist die Kurve der elektromotorischen Kraft nicht ganz so scharf, wie die ausgezogene Linie zeigt; die Spitze ist abgerundet und die Seiten sind mehr wellenförmig, sodass die Kurve sich thatsächlich der wahren Sinuslinie (siehe die punktierte Kurve in Fig. 19) stark nähert. Wenn man jedoch solche Verfeinerungen beiseite lässt, so ist es leicht, für jeden gegebenen Fall entweder graphisch, mit Benutzung derartiger Diagramme, wie sie die Fig. 16 bis 19 zeigen, oder analytisch einen Ausdruck für die effektive Spannung auszuarbeiten. Die Operation ist etwas mühsam, aber keineswegs schwierig, und es würde nutzlos sein, dieses Werkchen damit zu belasten. Wenn

wir uns vergegenwärtigen, dass für eine Wechselstrommaschine mit p Polpaaren eine Umdrehung p Periode,

$$\frac{v}{60} \text{ Umdrehungen } \frac{v}{60} \cdot p \text{ Perioden}$$

in der Sekunde erzeugt. Führen wir also

$$\frac{v}{60} \cdot p = n$$

in Gleichung 14 ein, so wird

$$e_f = k \cdot F \cdot n \cdot m \cdot 10^{-8} \text{ Volt} \quad 16)$$

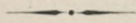
Um die effektive elektromotorische Kraft e_f zu finden, müssen wir deshalb den Koeffizienten k für jeden Fall bestimmen, und wie ich schon sagte, ist dies durchaus keine schwierige mathematische Aufgabe. Das Resultat für die Fälle, welche ich angeführt habe, lautet folgendermassen:

1. Wenn die Maschine eine genau sinusartige Kurve der elektromotorischen Kraft liefert $k = 2,22$
2. Breite der Pole gleich Entfernung der Polmitten voneinander und Länge der Spulen gleich dieser Polmittenentfernung $k = 1,160$
3. Polbreite gleich der Polmittenentfernung und Spulenlänge gleich der halben Polmittenentfernung $k = 1,635$
4. Polbreite gleich der halben Polmittenentfernung und Spulenlänge gleich der Polmittenentfernung $k = 1,635$
5. Polbreite gleich der halben Polmittenentfernung und Spulenlänge gleich der halben Polmittenentfernung $k = 2,300$

Wenn wir den ersten und den letzten Wert dieser Tabelle vergleichen, so finden wir, dass zwischen den beiden Koeffizienten nur

ein Unterschied von $\frac{2,300}{2,22} = \frac{115}{111} = 3,5\%$ besteht. Der letzte Wert

von $k = 2,30$ entspricht den Maschinen, wie sie gegenwärtig gebaut werden, und der erste Wert von $k = 2,22$ den idealen Maschinen, welche eine wahre Sinuskurve für die elektromotorische Kraft geben. Wir sehen, soweit die effektive elektromotorische Kraft in Frage kommt, ist die Annahme, dass die gewöhnlichen Wechselstrommaschinen dem Sinusgesetze folgen, praktisch richtig.



Kapitel V.

Mechanische Konstruktion der Wechselstromdynamos.

Allgemein können wir sagen, dass die konstruktiven Anforderungen und die Punkte, auf welche wir beim Entwerfen von Wechselstrommaschinen besondere Rücksicht nehmen müssen, nahezu dieselben sind wie bei den Gleichstrommaschinen; aber es giebt doch gewisse Unterschiede. Vor allem ist der Anker einer Gleichstrommaschine wegen des Kollektors und der Bürsten notwendigerweise komplizierter als der einer Wechselstrommaschine. Andererseits ist das Magnetfeld einfacher. Die Mehrzahl der Gleichstromdynamos sind für niedrige oder doch mässige Spannungen gebaut, während Wechselstromdynamos gewöhnlich für hohe Spannungen konstruiert sind. Dieser Umstand erfordert grössere Sorgfalt in der Isolation und zwingt uns, gewisse Windungsmethoden, welche für eine 100 Volt-Gleichstromdynamo durchaus zulässig sind, zu vermeiden. Bei dem Entwurfe beider Maschinenarten müssen wir auf Wirbel-(Foucault-)ströme und Hysteresis Rücksicht nehmen, bei Wechselstromdynamos aber sind diese störenden und schädlichen Erscheinungen weit ernster als bei Gleichstrommaschinen. Der Grund ist der, dass sowohl der Draht als das Eisen, wenn nämlich der Anker einen Eisenkern hat, einer schnelleren Induktionsänderung unterworfen sind. Deshalb müssen besondere Vorsichtsmassregeln angewendet werden. Der Kern muss gut unterteilt sein, und der Leiter sollte einen gewissen Querschnitt nicht überschreiten. Wie gross dieser Maximalquerschnitt sein sollte, hängt natürlich von dem allgemeinen Entwurfe der Maschine ab, aber wir können ungefähr annehmen, dass, wo runder Draht gebraucht wird, sein Durchmesser $3,5\text{ mm}$ nicht überschreiten soll, und wo Kupferstreifen verwendet werden, die Dicke nicht mehr als $2,5\text{ mm}$ betragen soll. Ein anderes und sehr wirksames Mittel zur Vermeidung von Wirbelströmen besteht darin, den Leiter ganz in Eisen einzubetten, eine Anordnung, welche zuerst von Wenström vorgeschlagen und jetzt allgemein benutzt wird. Ein Beispiel hierfür

ist Brown's grosse Dreiphasen-Wechselstrommaschine in Lauffen. Der Leiter ist ein solider Kupferstab von ungefähr 38 *mm* Durchmesser, welcher durch Löcher in dem Ankerkern gezogen ist. Ein Leiter dieser Dicke würde, wenn er auf die Oberfläche eines Ankers gebracht würde, der einigen 80 Feldänderungen pro Sekunde unterworfen ist, in wenigen Minuten heiss werden; jedoch bleibt er so, wie er in Brown's Dreiphasenmaschine angeordnet ist, vollkommen kühl. Die Thatsache ist die, dass der Leiter auf allen Seiten von Eisen umgeben ist, und dies bringt das genannte Resultat hervor. Eine noch schlagendere Illustration von der Wirkung des Eisens in der Verhinderung der Wirbelströme ist Thomson's Schweissmaschine. Hier haben wir einen soliden Leiter von vielen Quadratcentimetern im Querschnitt, in welchem der zum Schweissen notwendige, sehr starke Strom erzeugt wird. Aber dieser Leiter bildet den Sekundärkreis eines Transformators und ist von dem Eisen des Transformators umgeben. Professor Thomson's Erklärung der Thatsache, dass in allen diesen Fällen Wirbelströme vermieden werden, ist die, dass die Geschwindigkeit, mit der der Draht die Kraftlinien durchschneidet, viel grösser ist als seine Fortbewegungsgeschwindigkeit, sodass die Kraftlinien thatsächlich zuerst nachgeben und sich sozusagen strecken, aber schliesslich, wenn ihre Spannung zu gross wird, plötzlich hinter dem Drahte abschnappen. So werden alle Teile des Drahtes fast in demselben Augenblicke von den Kraftlinien geschnitten, und dieser Augenblick lässt keine Zeit übrig, während welcher die Unterschiede in der elektromotorischen Kraft und infolgedessen die dadurch bedingten Wirbelströme in dem Drahte entwickelt werden könnten. Ich persönlich fühle mich nicht berufen, diese Erklärung zu bestätigen oder zu widerlegen; da sie jedoch von einer so hohen Autorität wie Professor Elihu Thomson kommt, so begnüge ich mich damit, sie anzunehmen. Dass Drähte, welche in Eisen eingebettet oder auf allen Seiten von Eisen umgeben sind, nahezu frei von Wirbelströmen sind, ist jedenfalls eine unzweifelhafte Thatsache.

Nach dem, was ich hier gesagt habe, sehen wir, dass wir den Energieverlust durch Wirbelströme in Wechselstrommaschinen auf die eine oder andere Weise vermeiden oder doch wenigstens sehr vermindern können. Nun wollen wir sehen, ob dies auch bei der anderen Verlustquelle, nämlich der »Hysteresis«, der Fall ist. Unter diesem Ausdrucke verstehen wir eine gewisse Erscheinung, welche zuerst von Ewing¹⁾ untersucht wurde und gemeinverständlich als »magnetische Reibung« bezeichnet werden kann. Die Kraftlinien

¹⁾ Die Priorität, diese Art magnetischer Erscheinungen zuerst untersucht zu haben, dürfte wohl Herrn Professor Warburg gebühren. (Anm. d. Übersetzers.)

ändern, indem sie erzwungen durch den Eisenkern des Ankers gezogen werden, fortwährend ihre Magnetisierung, und der Kern wird, selbst wenn er sehr sorgfältig unterteilt ist, um die Wirbelströme zu vermeiden, dennoch warm, wenn er sich in erregtem Magnetfelde dreht. Natürlich wird die so nutzlos verbrauchte Energie um so grösser sein, je schneller die Änderung der Magnetisierung und je grösser ihr Betrag ist. Dieser Verlust findet sowohl in Gleichstrom- als in Wechselstrommaschinen statt, aber in verschiedenem Grade. In einer Gleichstromdynamo ist die Änderung verhältnismässig langsam. Nehmen wir z. B. eine zweipolige Maschine, welche mit 600 Touren pro Minute oder mit 10 Touren pro Sekunde läuft. Die ganze Masse des Ankerkernes erfährt deshalb in jeder Sekunde zehn vollständige Kreisläufe der magnetischen Änderung. In den

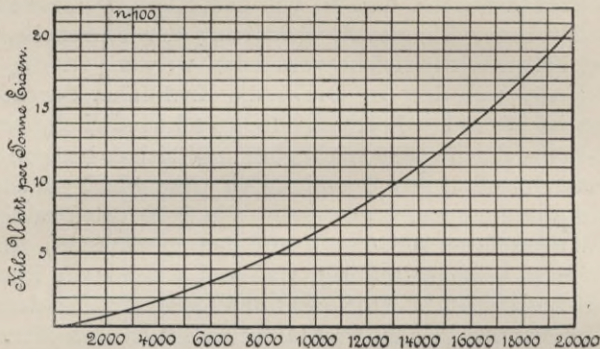


Fig. 20.

jetzigen Wechselstrommaschinen ist aber die Änderung ungefähr zehnmal so schnell, da die Frequenz durchschnittlich gleich 100¹⁾ ist. Wenn wir dieselbe Induktion, d. h. dieselbe Anzahl Kraftlinien pro Quadratcentimeter des Kernquerschnittes, zulassen würden, so würde die Wechselstromdynamo die zehnfache Energie nutzlos verbrauchen, und dies würde natürlich unzulässig sein. Es giebt daher nur einen Weg, auf dem wir den Energieverlust verringern können, und dieser besteht darin, dass wir eine geringere Induktion anwenden. Sie beträgt deshalb in Wechselstrommaschinen ungefähr 5000 Kraftlinien pro Quadratcentimeter, während sie in Gleichstrommaschinen zwischen 14000 und 20000 Linien liegt. Die genaue

¹⁾ Diese Zahl gilt im allgemeinen für die englischen und amerikanischen Maschinen; auf dem Kontinent arbeitet man mit 50 Perioden und darunter. (Anm. d. Übersetzers).

Induktion, mit der in einem bestimmten Falle am besten gearbeitet wird, ändert sich natürlich mit der Type und der Grösse der Maschine, und da jeder Entwurf gewissermassen ein Kompromiss in der Abmessung der einzelnen Teile zu einander ist, so dürfen wir die Zahl 5000 nicht als eine unumstössliche Regel betrachten.

Um den Leser jedoch in den Stand zu setzen, jeden gegebenen Fall nach seinem eigenen Ermessen zu behandeln, gebe ich in Fig. 20 eine Kurve, welche den Energieverlust durch Hysteresis pro Tonne Eisen zeigt, wenn die Frequenz 100 beträgt. Die Induktion ist auf der Horizontalen und die Energie in Kilowatt auf der Vertikalen aufgetragen. Die Kurve ist nach den Versuchsergebnissen des Professor Ewing aufgezeichnet worden. Ich will zugleich erwähnen, dass diese Kurve näherungsweise dargestellt wird durch die Gleichung ³⁾

$$\text{Energieverlust} = 180 \left(\frac{B}{1000} \right)^{1.55} \dots \dots \dots 17)$$

oder, wenn die Induktion B in englischen Linien pro Quadratzoll gegeben ist,

$$\text{Energieverlust} = 160 \cdot B^{1.55} \dots \dots \dots 18)$$

Der Energieverlust durch Hysteresis ist in Kilowatt pro Tonne Eisen angegeben, für den Fall, dass die Frequenz gleich 100 vollständigen Kreisläufen pro Sekunde ist. Für eine andere Frequenz ändert sich der Energieverlust proportional.

Da nun notwendigerweise immer ein Energieverlust stattfindet, wenn der Anker einen Eisenkern enthält, so war es naturgemäss, dass Erfinder ihre Aufmerksamkeit der Konstruktion einer Wechselstrommaschine mit kernloser Armatur zuwendeten. Thatsächlich hat die Meritens-Maschine, welche eine der ersten brauchbaren Wechselstromdynamos war, kein Eisen im Anker. Dann folgt ebenfalls ohne Eisen die Siemens-, die Ferranti- und die Mordey-Maschine. In allen diesen Maschinen wird der Verlust durch Hysteresis vermieden, und wenn dieses die einzige Überlegung wäre, so würden sie ohne Zweifel besser sein als ihre Nebenbuhler mit Eisenkernankern. Aber wie ich schon sagte, ist jeder Entwurf ein Kompromiss, und es ist sehr wohl möglich, dass die Maschine mit Eisen in ihrem Anker ein ebenso guter Kompromiss ist wie die ohne Eisen. Die Thatsache, dass die Mehrzahl der amerikanischen Maschinen, ferner alle deutschen Maschinen, die jetzt von Siemens & Halske ausgeführten mit einbegriffen, und gut die Hälfte der englischen Maschinen Eisenkernanker haben, ist an sich schon ein genügender Beweis,

³⁾ Steinmetz giebt in seinen klassischen Untersuchungen über Hysteresis den Exponenten 1,6, eine Zahl, mit der jetzt wohl allgemein gerechnet wird. (Anm. d. Übersetzers.)

dass der Hysteresisverlust kein unüberwindliches Hindernis ist. Besonders zwei Punkte sprechen zu Gunsten des Eisenkernes. Der erste ist der, dass wir hierdurch in den Stand gesetzt sind, dem Anker eine grössere mechanische Festigkeit zu geben als es in Maschinen möglich ist, deren Ankerspulen einzeln befestigt und durch Isoliermaterial gehalten werden. Der zweite ist der, dass die Gegenwart von Eisen den magnetischen Widerstand des Luftzwischenraumes vermindert und so an Erregerenergie spart. In Brown's Dreiphasenmaschine z. B. erfordert die ganze Erregerenergie nicht mehr als $\frac{1}{2}\%$ der ganzen Maschinenleistung.¹⁾

Ich habe vorher von den Unterschieden zwischen Gleichstrom- und Wechselstrommaschinen vom elektrischen und mechanischen Gesichtspunkte aus gesprochen. Es bleibt noch übrig, auf einen wichtigen Unterschied aufmerksam zu machen, nämlich auf die Abwesenheit des Kollektors und der Bürsten bei Wechselstromdynamos. Wir alle wissen, dass diese die empfindlichsten Teile einer Gleichstrommaschine sind, und obgleich diese Teile in den gegenwärtigen Maschinen mit mässiger Spannung vollkommen zuverlässig und leicht zu handhaben sind, so liegt der Fall doch anders, wenn wir versuchen, Gleichstrommaschinen für 1000 oder 2000 oder noch mehr Volt zu bauen. Wir begegnen dann Schwierigkeiten, welche bei den Wechselstrommaschinen nicht vorhanden sind, und hauptsächlich aus diesem Grunde fangen die Ingenieure, welche Arbeitsübertragungsanlagen auf weite Entfernungen zu entwerfen haben, an, ihre Aufmerksamkeit einigen Wechselstrommaschinentypen zuzuwenden, da diese das sicherste Mittel zur Lösung solcher Aufgaben sind. Ich werde später noch ausführlicher über diesen Gegenstand zu berichten haben. Fürs erste muss ich meine Bemerkungen auf die für Beleuchtungszwecke gebauten Maschinen beschränken.

¹⁾ Induktionsfreie Belastung vorausgesetzt. (Anm. d. Übersetzers.)

Kapitel VI.

Beschreibung einiger Wechselstrom- maschinen-Typen.

In der beschränkten Zeit, die mir zur Verfügung steht, würde es mir unmöglich sein, etwa einen erschöpfenden Bericht der verschiedenen, gegenwärtig im Gebrauch befindlichen Maschinen zu geben. Ich werde deshalb nur einige von ihnen als Vertreter je einer ganzen Truppe beschreiben.

1. Die Ferranti-Maschine. — Die Feldmagnete bestehen aus schmiedeeisernen Stäben von trapezförmigem Querschnitt (Fig. 21);

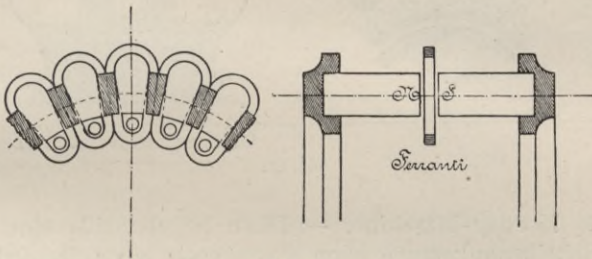


Fig. 21.

sie sind eingesetzt in massive Joehringe, welche rechtwinklig zur Welle beiseite geschoben werden können, sodass der Anker auf diese Weise zur Untersuchung und Ausbesserung frei gelegt wird. Der letztere ist ein Scheibenanker, und die Spulen sind paarweise eingefügt. Der Leiter ist ein gerunzelter Kupferstreifen, welcher mit einem Streifen Vulkanfiber von gleicher Breite umwunden ist und auf einem unterteilten Messingkern aufliegt. Der Leiter ist so von dem Kerne und dieser von dem Ringe, der den Kern trägt, isoliert. Diese doppelte Isolation ist ein gewichtiger Punkt in der Konstruktion der Ferranti-Maschine. Der Kern wird in Backen von Kanonenmetall, welche mit seitlichen Flügeln für die Ventilation versehen sind, gehalten. Die Befestigung jedes Backenpaares an dem Ankerringe geschieht vermittels eines Schaftes, welcher durch iso-

lierte Achsenbleche hindurchgeht und in einer Höhlung des Ringes festsitzt. Die Höhlung ist mit Schwefel ausgegossen. Um einen zu grossen Verlust durch Wirbelströme zu vermeiden, wird der Leiter sehr dünn ausgeführt; die Windung wird deshalb in zwei, vier oder noch mehr parallele Stromkreise aufgespalten. Ich möchte hier nebenbei erwähnen, dass bei den Maschinen, in welchen eine Ankerwindung in dieser Weise aufgespalten ist, grosse Sorgfalt darauf verwendet werden muss, dass alle Magnete von gleicher Stärke sind, da andererseits mit dieser Ankerwicklung Differentialströme entstehen würden, welche weit mehr Energie verschlingen würden, als die Wirbelströme, welche diese Anordnung zu vermeiden sucht. Die Ferranti-Maschinen, welche jetzt in Deptford arbeiten, geben eine elektromotorische Kraft von 10000 Volt, und um ein Überspringen dieser Spannung nach den Magneten zu verhindern, sind die letzteren mit doppelten Ebonitkappen versehen.

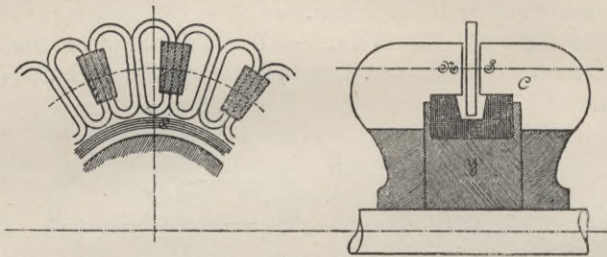


Fig. 22.

2. Die Mordey-Maschine. — Diese ist ebenfalls eine Maschine von der Scheibenankertype ohne Eisenkerne, aber die Ankerscheibe steht fest, während sich die Magnete drehen. Die Ankerspulen (Fig. 22) sind keilförmig gestaltet, und der Leiter ist ein dünner Kupferstreifen, welcher auf einen Schieferkern aufgewunden ist; die Kernlager sind, wie bei den Ferranti-Spulen, durch einen dünnen Streifen von Isolationsmaterial isoliert. Die Befestigung ist an dem äusseren und weiteren Ende der Spule an einem Ringe aus Kanonenmetall, welcher das Ganze trägt, ausgeführt. Die Magnete sind aus Gusseisen hergestellt und so gestaltet, dass sie nur eine einzige Erregerspule C erfordern. Diese Spule ist um einen centralen cylindrischen Teil y gewunden, an dessen beide Seiten sich Polstücke von besonderer Sternform anschliessen. Infolgedessen haben die Pole auf der einen Seite des Ankers alle dasselbe Vorzeichen und die auf der anderen Seite das entgegengesetzte Vorzeichen, sodass die Kraftlinien von N nach S rechtwinklig die Ankeroberfläche

schneiden, und zwar in derselben Richtung. Wir haben hier deshalb, streng genommen, keine Umkehr der Magnetisierung, sondern nur eine Änderung von der vollen Induktion in dem Augenblicke, wo sich der Draht gerade zwischen zwei gegenüberliegenden Polen befindet, zur Induktion Null in dem Augenblicke, wo er sich gerade zwischen zwei benachbarten Polen befindet; die Gesamtwirkung ist daher dieselbe, als wenn wir die halbe, aber wie sonst wirklich wechselnde Feldstärke hätten. Um unsere Formel für die elektromotorische Kraft auf diese Maschine anwenden zu können, müssen wir demnach nicht die ganze Feldstärke F oder Z , sondern nur ihren halben wahren Wert in die Rechnung einführen.

3. Die Westinghouse-Maschine. — Als passendes Beispiel für eine Wechselstrommaschine, deren Anker Eisen enthält, können wir die Westinghouse-Maschine wählen, welche in ihren Hauptteilen der Thomson-Houston-Maschine sehr ähnlich ist. Der Anker ist cylindrisch (Fig. 23); er ist mit gelenkartig gestalteten Spulen bedeckt, deren Drähte parallel zur Welle verlaufen; die abgerundeten Enden der Spulen C sind einwärts gebogen und an den Endflächen des Ankerkernes befestigt. In den Thomson-Houston-Maschinen sind die Spulenden nicht nach innen gerichtet. Die Feldmagnete NS sind auf der Aussenseite des Ankers radial angeordnet und durch einen Jochring Y miteinander verbunden. Unserer

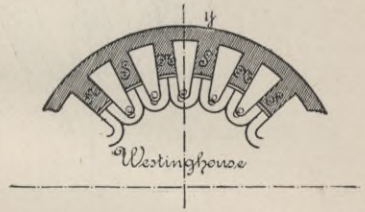


Fig. 23.

Theorie entsprechend, wäre die beste Anordnung die, dass die Spulenbreite gleich der halben Polmittenentfernung gemacht würde, d. h. dass der kreisbogenförmige Spulenraum gleich der Breite der Magnetpole wäre. Professor Thomson fand jedoch, als er mit verschiedenartigen Spulen Versuche anstellte, dass eine Spule, welche eine nur wenig geringere Breite nach innen zu hatte, eine höhere elektromotorische Kraft lieferte für den Fall, dass die Maschine mit voller Belastung arbeitete. Seine Erklärung ist die, dass der Strom in den Ankerdrähten die ursprüngliche Magnetisierung des Feldes ändert, indem es das Bestreben hat, die Kraftlinien gegen diejenige Kante des Polstückes zu verdichten, welche er verlässt, und so ein stärkeres, aber engeres Feld hervorbringt. Die innere Breite der Spulen, welche frei ist von Windungen, sollte deshalb enger ausgeführt werden.

4. Die Kapp-Maschine. — In dieser Maschine (Fig. 24) ist der Anker von der Scheibentype. Er enthält einen Eisenkern A , welcher dadurch erhalten wird, dass ein Streifen von dünnem Holzkohlen-

eisen mit einem Streifen Papier auf einen Ring aufgewickelt ist, der das Ganze trägt. Die Spulen werden quer um den Kern gewunden. Die Feldmagnete in den grösseren Maschinen sind von Schmiedeeisen mit ausgedehnten Polschuhen und sind parallel zur Welle auf beiden Seiten des Armaturkerns angeordnet, sodass sie dieselben Pole NN SS auf den entgegengesetzten Seiten darbieten. Die äusseren Enden der Magnete sind durch gusseiserne Joche YY verbunden. Entsprechend der besonderen Winkellage der Polschuhe, tritt jeder Draht nicht gleichzeitig über seine ganze Länge in das Feld ein, sondern der Eintritt ins Magnetfeld erfolgt etwas allmählicher, wodurch die scharfen Spitzen in der Kurve der elektromotorischen Kraft (Fig. 19) abgerundet werden und die Kurve sich der Sinusform sehr stark nähert. Der Strom wird durch Schleifkontakte von isolierten Schleifringen abgenommen, welche an entgegengesetzten Seiten des Ankers angebracht sind, d. h. so weit voneinander getrennt, dass

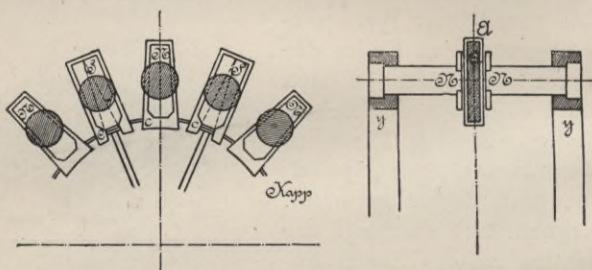


fig. 24.

es für einen Menschen unmöglich ist, beide gleichzeitig zu berühren. Der Koeffizient k für diese Maschine liegt zwischen 2,3 und 2,7, entsprechend der jeweilig gewählten Anordnung.

5. Die Kingdon-Maschine. — Bei allen bisher beschriebenen Maschinen ist der Draht entweder auf dem Magnetfelde oder auf dem Anker in Bewegung, in der Kingdon-Maschine dagegen befinden sich alle Drähte in Ruhe; hier ist der einzige sich drehende Teil ein Anker, welcher keinen Draht enthält. Die Maschine besteht aus einem unterteilten Eisencylinder mit radialen, nach innen gerichteten Zähnen, und die Anker- und Feldspulen sind abwechselnd über je einen Zahn gewickelt. Der sich drehende Teil ist ein Rad, welches gerade mit halb sovielen unterteilten Eisenvorsprüngen versehen ist, als sich Zähne auf dem feststehenden Teile befinden, und diese Vorsprünge sind so angeordnet, dass sie die benachbarten Zähne magnetisch überbrücken. Infolgedessen werden die Zähne auf welche die Ankerspulen aufgewickelt sind, abwechselnd Teile eines positiven

und negativen magnetischen Kreises, sodass ein Wechselstrom hervorgebracht wird.

6. Die Kennedy-Maschine. — Herr Kennedy hat ferner folgenden Gedanken entwickelt, hauptsächlich um die Zahl der Anker- und Feldspulen zu vermindern und die Erzeugung eines Wechselstromes in den letzteren zu vermeiden. Die Maschine (Fig. 25) hat zwei Anker- und zwei Feldspulen; diese sind paarweise gewickelt und in Vertiefungen eines Rahmengestelles angebracht, welches aus unterteilten weichen Eisenstäben besteht. Es befinden sich nun auf der Welle zwei Räder mit Vorsprüngen; diese Räder sind aber um eine halbe Periode gegeneinander versetzt, sodass, wenn die Vorsprünge des einen Rades die magnetischen Kreise rund um das eine Paar

der Feld- und Ankerspulen vollständig geschlossen haben, die Vorsprünge des anderen Rades sich gerade in der Mitte zwischen festen Stäben befinden und die magnetischen Kreise rund um das zweite Paar

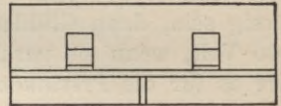
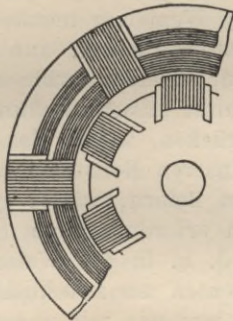


Fig. 25.

der Anker- und Feldspulen unterbrochen sind. Die elektromotorische Kraft in den einen Spulen ist in diesem Augenblicke Null, und sie ist ebenfalls Null in den anderen Spulen, durch welche gerade die maximale Induktion geht. Eine halbe Periode später wird die Induktion ein Maximum in dem zweiten und Null in dem ersten Spulenpaar, und diese Induktionsänderung erzeugt eine wechselnde elektromotorische Kraft in allen Spulen. Nun ist es natürlich möglich, die beiden Feldspulen in Reihe zu schalten und auf diese Weise, da die elektromotorische Kraft, welche in dem einen Paar erzeugt wird, der in dem anderen Paar entgegengesetzt ist, die Rückwirkung der Vorsprünge auf den (Gleichstrom-) Erregerkreis aufzuheben. Die erregende Gleichstrommaschine hat dann nur den Ohm'schen Widerstand der beiden Spulenpaare, wie in irgend einer anderen Gleichstrommaschine, zu überwinden. Die beiden Ankerspulenpaare können natürlich in Reihe oder parallel geschaltet werden.

Kapitel VII.

Transformatoren.

Ich habe schon darauf aufmerksam gemacht, dass Wechselstromdynamos gewöhnlich für hohe Spannung entworfen werden. Der Grund ist selbstverständlich. Wenn wir nämlich den Strom, sei es für Beleuchtung oder Arbeitsübertragung, auf eine beliebig grosse Entfernung übertragen wollen, so müssen wir eine hohe Spannung gebrauchen, um den Querschnitt unserer Leitungsdrähte oder Kabel auf eine Grösse herunterzudrücken, welche das ganze Unternehmen finanziell möglich macht. Unseren Konsumenten aber einen Strom von einigen Tausend Volt zu liefern, würde gefährlich und unzulässig sein, denn Glühlampen erfordern einen Strom von ungefähr 100 Volt, wenn sie parallel, d. h. in der Weise geschaltet werden, wie es für die Privatkonsumenten am zweckmässigsten ist. Es erhebt sich deshalb die Frage, was wir mit unserem hochgespannten Strome anfangen sollen, wenn wir ihn an den Platz gebracht haben, wo seine Energie für Beleuchtungszwecke gebraucht werden soll. Natürlich müssen wir ihn transformieren: wir müssen seine Spannung erniedrigen und seine Stärke erhöhen. Nun giebt es zwei Wege, auf denen dies geschehen kann. Wir können den Strom brauchen, um einen Motor anzutreiben; die von diesem abgegebene Arbeit verwenden wir wieder, um eine Gleichstromdynamo von 100 oder 200 Volt anzutreiben. Der Gleichstrom kann dann in der gewöhnlichen Weise den Lampen zugeführt werden, und wir können die Anlage sogar mit Akkumulatoren versehen, sodass wir im stande sind, unsere Maschinen während der Stunden des geringsten Bedarfs abzustellen. So viel ich weiss, ist dieses Transformierungssystem bis jetzt nur in Kassel (in Deutschland) verwendet. Auf den ersten Blick scheint es kompliziert und kostspielig zu sein, aber es hat manche Vorteile, welche wahrscheinlich zur Annahme dieses Systems auch in anderen Städten führen werden.

Das andere System, welches sich gegenwärtig im allgemeinen Gebrauche befindet, ist das der direkten Transformation mit Hilfe von Induktionsspulen. Hier brauchen wir keine sich bewegenden

Maschinen, sondern lediglich einen feststehenden Apparat, welcher aus einem unterteilten Eisenkern und zwei Spulen (Fig. 26) besteht. Die eine dieser beiden besteht aus vielen Windungen dünnen Drahtes und wird technisch als Primärspule P bezeichnet; die andere mit wenigen Windungen dicken Drahtes wird die Sekundärspule S genannt. Der hochgespannte Strom wird durch die Hauptleitungen w zugeführt, und der niedrig gespannte Strom speist durch die Sekundärleitungen W die Lampen L. Wir sehen, dass absolut keine Verbindung zwischen den beiden Leitungen besteht, und dieser Umstand bietet eine grosse Garantie für die Sicherheit des Systems. Die Wirkung dieses Apparates, welcher technisch unter dem Namen »Transformator« bekannt ist, wird nach dem, was ich früher über die Erzeugung einer wechselnden elektromotorischen Kraft gesagt habe, klar. Die Primärspule magnetisiert den Eisenkern in wechselnden Richtungen, und bei jeder Änderung schneiden die Kraftlinien die Drähte der Sekundärspule. Die letztere muss deshalb der Sitz einer wechselnden elektromotorischen Kraft werden. Wenn wir mit F die totale Induktion bezeichnen und n die Frequenz nennen, so ist die maximale elektromotorische Kraft, welche in jeder Drahtwindung erzeugt wird,

$$2 \pi n F,$$

und die effektive elektromotorische Kraft ist gleich diesem

Werte, dividiert durch die Quadratwurzel aus 2. Wenn die Spule m_2 Windungen enthält, so wird die totale effektive elektromotorische Kraft in der ganzen Spule

$$e_{f_2} = \frac{2 \pi n F}{\sqrt{2}} \cdot m_2 \cdot 10^{-8} \text{ Volt}$$

oder

$$e_{f_2} = 4,45 \cdot n F m_2 \cdot 10^{-8} \text{ Volt} \dots \dots \dots 19)$$

Die wechselnde Induktion beeinflusst jedoch nicht nur die sekundäre, sondern auch die primäre Spule, und in der letzteren wird eine elektromotorische Kraft entwickelt, welche wir durch die nämliche Formel berechnen, indem wir nur für m_2 die Zahl m_1 der primären Windungen einsetzen. Wir sehen daher, dass das Transformierungsverhältnis durch das Verhältnis der Drahtwindungen in jeder Spule gegeben ist; dies gilt aber nur näherungsweise, da nicht die ganze elektromotorische Kraft, welche in der Sekundär-

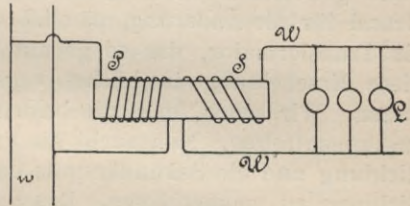


Fig. 26.

spule erzeugt wird, die Klemmen dieser Spule erreicht. Wir müssen nämlich die elektromotorische Kraft abziehen, welche verbraucht wird, um den Ohm'schen Widerstand der Sekundärspule zu überwinden. In gleicher Weise ist die elektromotorische Kraft, welche sich dem Strome in der Primärspule entgegensetzt, etwas kleiner als die primäre Klemmenspannung, weil der Ohm'sche Widerstand der Primärspule ebenfalls einen Teil der Spannung verbraucht. Bezeichnen wir mit k_1 und k_2 die Klemmenspannungen, mit i_{f_1} und i_{f_2} die Stromstärken und mit r_1 und r_2 die Ohm'schen Widerstände der Primär- und Sekundärspule, so gilt unseren Betrachtungen entsprechend

$$k_1 = e_{f_1} + i_{f_1} \cdot r_1 = 4,45 \cdot n F m_1 \cdot 10^{-8} + i_{f_1} \cdot r_1 \quad . \quad 20)$$

und

$$k_2 = e_{f_2} - i_{f_2} \cdot r_2 = 4,45 \cdot n F m_2 \cdot 10^{-8} - i_{f_2} \cdot r_2 \quad . \quad 21)$$

Das Transformationsverhältnis ändert sich deshalb mit der Belastung, aber ich bemerke gleich, dass die Änderung, soweit sie vom Ohm'schen Widerstande herrührt, ausserordentlich klein ist, und zwar gewöhnlich nur 2% beträgt. Es giebt jedoch noch einen Grund für die Änderung, nämlich die magnetische »Streuung«, und ein Transformator, der so gebaut ist, wie Fig. 26 es zeigt, würde diese Erscheinung in höchst verwerflicher Weise zu Tage treten lassen. Wir sehen, dass die beiden Spulen in der Mitte des Kernes zusammentreffen. Nun sucht die Primärspule den Kern in der einen Richtung und die Sekundärspule denselben in der entgegengesetzten Richtung zu magnetisieren. Das Resultat ist, dass die beiden Kraftlinien-Induktionsströme sozusagen in der Mitte des Kernes in Kollision geraten, und einige von den Kraftlinien, welche die Primärspule durch die Sekundärspule zu schicken sucht, werden infolgedessen seitwärts herausgepresst, ohne einen Beitrag zur sekundären elektromotorischen Kraft zu liefern. Man könnte denken, dass dies von keiner Bedeutung sei, denn wir könnten ja diesen Kraftlinienverlust dadurch ausgleichen, dass wir einige Windungen mehr auf die Sekundärspule bringen. Wenn wir dies jedoch thäten, würden wir eine zu grosse elektromotorische Kraft bei geringer Belastung des Transformators bekommen.

Um dieses einzusehen, wollen wir einmal mit der Belastung Null im Sekundärkreise beginnen. Dann haben wir keinen Strom in S und keine Kollision. Die von der Primärspule erzeugten Kraftlinien gehen ohne Hindernis durch die Sekundärspule, und F in der Formel 19 hat seinen vollen Wert. Nun schalten wir einige Lampen ein, und es wird ein Sekundärstrom fließen. Wir werden jetzt eine Kollision der Kraftlinien haben, sodass F, und damit die elektromotorische Kraft, kleiner werden wird. Je mehr Lampen wir ein-

schalten, um so mehr Strom fliesst durch beide Spulen und um so heftiger wird die Kollision; um so grösser wird also auch die Zahl der verlorenen Kraftlinien. Kurz, wir erzeugen mehr Kraftlinien, als wir ausnutzen können. Das natürlichste Mittel zur Beseitigung dieses Übelstandes besteht darin, die Spulen relativ zu einander in eine solche Lage zu bringen, dass die von der Primärspule erzeugten Kraftlinien nicht entweichen können, während sie durch die Sekundärspule gehen. Wir können z. B. eine Spule über die andere wickeln, oder wir können die Spulen in kurze Abschnitte zerlegen und sie abwechselnd über den Kern verteilen. Selbst bei Anwendung dieser Vorsichtsmassregeln findet eine magnetische Streuung statt, aber sie erniedrigt die durch die Formel angegebene Spannung nicht mehr als um 1 bis 2%. Deshalb können wir von einem guten Transformator erwarten, dass wir bei konstanter Primärspannung eine sekundäre Klemmenspannung erhalten, welche zwischen 102 und 99 oder 98 Volt variiert, wenn die Belastung von Null bis zur vollen Leistung wächst. Diese Angaben beziehen sich auf kleine Transformatoren von 50 oder 100 Lampen. Bei grossen Transformatoren ist es sehr wohl möglich, den totalen Spannungsverlust auf etwas unter 2% herabzudrücken. Der in Fig. 26 veranschaulichte Transformator ist, abgesehen von seinem grossen Spannungsverlust, auch sonst noch mangelhaft. Die durch den Kern gehenden Kraftlinien müssen durch die Luft zurückkommen, und der grosse magnetische Widerstand ihres Weges durch die Luft erfordert einen starken Magneti-

sierungsstrom, oder mit anderen Worten, der Primärstrom wird beträchtlich grösser sein als in einem Transformator, in welchem den Kraftlinien der Rückweg leichter gemacht ist. Ein Weg, dieses Ziel zu erreichen, besteht darin, die Oberfläche der Kernenden zu vergrössern; dies hat Herr Swinburne in seinem »Igel«-Transformator gethan.

Der Kern besteht aus Eisendrähten, welche an den Enden nach auswärts gebogen sind. So führt der Rückweg wenigstens teilweise durch Eisen. Eine andere Methode, welche allgemein im Gebrauche ist, besteht darin, dass man den ganzen Rückweg aus Eisen herstellt. Wir können z. B. einen geschlossenen Eisenrahmen (J, Fig. 27) verwenden und die Primär- und Sekundärspulen C übereinander auf zwei entgegengesetzte Seiten des Rahmens wickeln. Der Eisenrahmen oder Kern besteht aus dünnen, mehr oder weniger voneinander isolierten Platten, um die Wirbelströme zu vermeiden. Diese Trans-

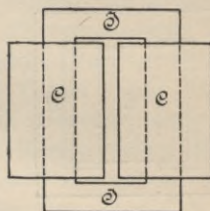


Fig. 27.

formatorentype wird ein »Kerntransformator« genannt. Oder wir können nur eine Spule anwenden und diese mit einem doppelten Rahmen, wie in Fig. 28, d. h. mit einer Art Eisenschale oder Eisenmantel umgeben; eine derartige Konstruktion heisst ein »Schalentransformator« oder, wie man in Deutschland gewöhnlich sagt, ein »Manteltransformator«. Beide Figuren sind so gezeichnet, dass sie Transformatoren von gleicher Leistung darstellen. Die Tiefe des Kernes ist für beide gleich angenommen worden; seine Breite dagegen ist in Fig. 28 zweimal so gross wie in Fig. 27 auszuführen, weil wir hier nur eine Spule haben. Auf den ersten Blick ist es schwer, zu sagen, welcher von beiden der bessere Transformator ist, obgleich praktisch die Vorteile bei der Manteltype zu überwiegen scheinen; diese Type wird auch mit Vorliebe von den Fabrikanten derartiger Apparate gewählt. Wenn wir uns nun fragen, worauf wir bei dem Entwurfe eines guten Transformators achten müssen, so finden wir, dass die Drahtlänge gering sein sollte, um den Ohm'schen Widerstand und die Kosten herabzudrücken, ferner, dass wir so wenig Eisen wie möglich verwenden sollten, und schliesslich, dass der magnetische Kreislauf kurz sein sollte.

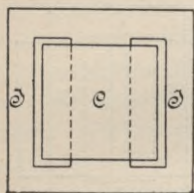


Fig. 28.

Nun sind dies aber sich widersprechende Bedingungen. Um nämlich die Drahtlänge zu vermindern, müssen wir mit einer hohen totalen Induktion arbeiten, sodass uns schon eine geringe Windungszahl die verlangte elektromotorische Kraft giebt. Eine hohe Induktion bedeutet aber

entweder einen grossen Verlust durch Hysterisis oder einen starken Kern, und ein starker Kern bedeutet wieder, dass die Länge jeder Drahtwindung gross ist. Er bedingt ferner einen längeren magnetischen Kreislauf und ein grösseres Eisengewicht, welches seinerseits wieder den Verlust durch Hysterisis vermehrt. Wir sehen hier wieder, dass der erfolgreiche Entwurf ein Kompromiss sein muss, aber ein Kompromiss, in welchem der Hysterisis ein Übergewicht gegeben wird. Wir müssen uns daran erinnern, dass ein Transformator beständig in Betrieb ist, einerlei, ob wir ihm Strom entnehmen oder nicht; infolgedessen dauert der Hysterisisverlust Tag und Nacht an. Deshalb wird selbst ein Hysterisisverlust von nur $\frac{1}{2}\%$ in dem durchschnittlichen Nutzeffekt des Transformators sehr fühlbar sein; dieser Verlust wird daher vom ökonomischen Gesichtspunkte aus ernster sein als ein Verlust von mehreren Prozenten durch Kupferwiderstand, weil die Transformatoren, wenn sie für Lichtzwecke verwendet werden, täglich nur sehr kurze Zeit mit voller Belastung arbeiten. Andererseits dürfen wir keinen übermässigen

Kupferverlust zulassen, da dies den Transformator wegen des zu grossen Spannungsverlustes unbrauchbar machen würde. Wir sind so nach allen Seiten hin gehemmt, indem wir bei Erfüllung der einen Bedingung wieder eine andere vernachlässigen, und der Entwurf eines guten Transformators ist keineswegs eine so leichte Aufgabe, wie es auf den ersten Blick erscheinen könnte. Als Ausgangspunkt können wir jedenfalls festlegen, dass der magnetische und elektrische Stromkreis so kurz wie möglich sein soll, und diese Bedingung wird am besten durch eine kreisförmige oder quadratische Gestalt oder durch eine möglichst grosse Annäherung an diese Form erfüllt. Thatsächlich finden wir auch, wenn wir die jetzt verbreiteten Transformatoren untersuchen, dass diese Bedingung in dem einen oder anderen Kreislaufe erfüllt ist, aber nicht in beiden gleichzeitig. Ich habe mich mit dem Entwerfe von Transformatoren nicht erfolgreich beschäftigt, und ich kann deshalb keine unumstösslichen Konstruktionsregeln geben; um dem Leser jedoch eine Anschauung davon zu bilden, welch bedeutenden Einfluss kleine Veränderungen in den Verhältnissen auf das Gewicht und die Kosten des Transformators haben, so habe ich zu diesem Zwecke 27 verschiedene Entwürfe, alle für einen 100 Lampen-Transformator, durchgerechnet. Sechzehn von diesen Entwürfen sind auf den Tafeln I und II am Schlusse des Buches in Aufriss und Grundriss wiedergegeben. In allen diesen Transformatoren beträgt der Kupferverlust 2 %. Der Hysteresisverlust ist in jedem Falle besonders angegeben. Wir sehen auf den ersten Blick, was für ein grosser Unterschied in Bezug auf das aufgewendete Kupfer besteht und wie durch geschickte Wahl der Verhältnisse die Kosten des Transformators vermindert werden können, ohne seinen Nutzeffekt herabzudrücken.

Ehe ich diesen Teil beschliesse, möchte ich noch auf die Beziehung aufmerksam machen, welche zwischen den linearen Dimensionen eines Transformators und seiner Leistung bzw. seines Hysteresisverlustes besteht. Angenommen, wir hätten einen Transformator berechnet und wären schliesslich zu einer Type gelangt, welche unseren Anforderungen entspräche; gesetzt aber, es sei nicht die Grösse, welche wir brauchen. Wir wollen deshalb einmal versuchen, was wir erhalten würden, wenn wir sämtliche Dimensionen, die des Drahtes eingeschlossen, doppelt so gross ausführten. Wir behalten die Induktion von 4000 oder 5000 Kraftlinien pro Quadratcentimeter bei, von der wir annehmen wollen, dass sie ungefähr $1\frac{1}{2}$ % Hysteresisverlust ergibt. Auch die Windungszahl in beiden Spulen behalten wir bei. Die totale Induktion ist dann viermal so gross, und die elektromotorische Kraft ist ebenfalls viermal so gross wie vorher. Der Widerstand der Spulen ist auf die Hälfte seines früheren

Wertes verringert worden, da die Länge des Drahtes zwar verdoppelt, aber auch gleichzeitig der Querschnitt vervierfacht ist. Wenn wir uns damit begnügen, denselben Kupferverlust beizubehalten, so können wir einen Strom zulassen, welcher uns einen viermal so grossen Spannungsverlust wie vorher ergibt; da aber der Widerstand jetzt nur halb so gross ist, so wird der Strom das Achtfache seines früheren Wertes betragen. Also ist der Strom achtmal und die Spannung viermal so gross wie vorher; die Leistung wird deshalb 8 mal 4 oder 32 mal so gross sein. Nun ist aber 32 gleich 2 zur fünften Potenz; wir sehen daher, dass sich die Leistung eines Transformators mit der fünften Potenz seiner linearen Dimensionen ändert. Das Gewicht, die Kosten und der Hysteresisverlust dagegen ändern sich alle mit der dritten Potenz der linearen Dimensionen, und das Gewicht pro Kilowatt Leistung ändert sich umgekehrt wie das Quadrat der linearen Dimensionen. Oder in Zahlen, wenn 40 Pfund (engl.) an Kupfer und Eisen für jedes Kilowatt, welches durch den kleinen Transformator erzeugt wird, erforderlich sind, so brauchen wir in dem grösseren nur 10 Pfund pro Kilowatt, und wenn der kleine Transformator 2% seiner Leistung für Hysteresis verbrauchte, so wird der grosse Transformator nur $\frac{1}{2}$ % verbrauchen. Soll also allgemein der grosse Transformator die x fache Leistung des kleinen haben, so müssen seine Dimensionen dem Ausdrucke $x^{1/5}$ proportional sein. Gewicht und Kosten pro Kilowatt, ferner der prozentuale Hysteresisverlust werden dem Ausdrucke $x^{3/5}$ proportional sein. Diese Überlegung vernachlässigt jedoch die Arbeitstemperatur, welche aus naheliegenden Gründen eine gewisse Grenze nicht überschreiten darf. In der Praxis hat man gefunden, dass für jedes Watt, das durch Hysteresis, Wirbelströme und Ohm'schen Widerstand verloren geht, eine abkühlende Oberfläche von 30 bis 60 Quadratcentimeter vorhanden sein muss. Da nun der grössere Transformator im Verhältnis zu seiner Leistung eine kleinere äussere Oberfläche besitzt als der kleinere Transformator, so ist es nicht möglich, das hier gegebene Gesetz zwischen linearen Dimensionen und Leistung in der einfachen Form anzuwenden. Wenn wir daher auf die Grösse der Erwärmung Rücksicht nehmen, so kommen wir sehr bald an eine Grenzleistung, wo eine weitere Vergrösserung der Dimensionen die Leistung kaum schneller als das Gewicht und die Kosten ändert. Deshalb hat man in der Praxis gefunden, dass, obgleich ein Transformator von 12 Kilowatt kaum ebenso viel wie vier Transformatoren von 3 Kilowatt wiegt, ein Transformator von 60 Kilowatt doch fast zweimal soviel wiegt wie ein Transformator für 30 Kilowatt.

Kapitel VIII.

Wechselstrom-Centralstationen und Verteilung von Wechselströmen.

Der hauptsächlichste Grund für die Verwendung von Wechselströmen in Verbindung mit der Lichtversorgung von einer Centralstation aus an Privatkonsumenten besteht darin, dass wir infolge der hohen Spannung, welche bei Einschaltung von Transformatoren ohne Gefahr gebraucht werden kann, im stande sind, weit entfernte Konsumenten ebenso gut mit Strom zu versorgen, wie solche, die in der Nähe der Centrale wohnen; inloedessen können die Lichtlieferanten einen grösseren Absatz und damit wieder einen grösseren finanziellen Vorteil erreichen, als wenn sie nur auf die Konsumenten in ihrer unmittelbaren Nähe angewiesen wären. Im allgemeinen ist der angeführte Grund durchaus richtig, aber es würde ein Irrtum sein, ihn ohne Unterschied anwenden zu wollen und zu sagen, dass in allen Fällen die Versorgung mit Wechselströmen derjenigen mit Gleichstrom vorzuziehen sei. Mag ein Ingenieur Elektrizitätswerke zu entwerfen oder von den anderen ausgeführte Werke nur zu beaufsichtigen und zu prüfen haben, immer wird es seine erste Sorge sein müssen, zu sehen, ob die Werke einen finanziellen Erfolg haben werden. Wir können niemals Centralstationen oder irgendwelche andere Werke ohne die Hilfe eines Geldmannes bauen, und der Geldmann kümmert sich sehr wenig um irgendwelche technische Vervollkommnungen; das einzige, was ihn kümmert, ist die Frage, ob sich das Werk bezahlt macht, und wenn der Ingenieur ihm nur diese Versicherung geben kann, so pflegt er nicht weiter mitzuarbeiten. Deshalb ist es die Aufgabe des Ingenieurs, seine Werke so zu entwerfen, dass sie nicht nur technisch, sondern auch finanziell Erfolg haben.

Wenn wir die relativen Vorzüge der beiden Systeme betrachten, so müssen wir eine Mannigfaltigkeit von lokalen Umständen in Rechnung ziehen, von denen manche nicht nur ausser dem Bereiche mathematischer Darstellung, das heisst der Darstellung durch kon-

krete Zahlen, liegen (die wir allein für unsere Berechnung brauchen können), sondern die selbst zu der Zeit, wo die Centrale entworfen wird, noch unbestimmt sind. Die Anzahl der Lampen z. B., welche in irgend einem gegebenen Distrikte erforderlich sind, ferner die tägliche Brenndauer jeder Lampe und die Verteilung der Lampen zwischen den einzelnen Häusergruppen in diesem Distrikte sind Dinge, welche wir niemals mit unumstösslicher Sicherheit voraussagen können. Wir können nur eine Mutmassung anstellen, welche auf früheren Erfahrungen beruht. Ein weiterer Punkt von Wichtigkeit, den man aber nur äusserst schwierig im voraus richtig beurteilen kann, besteht in der Gefahr, dass man mit einer Vorschrift in Betreff des Maschinenlärms oder der Erschütterungen von freundlichen Nachbarn bedacht wird, welche immer darauf aus sind, aus der schwierigen Lage anderer ihren Vorteil zu ziehen. Diese Gefahr ist augenscheinlich grösser bei dem Gleichstromsystem, weil wir bei diesem keine grosse Auswahl in Bezug auf die Lage unserer Station haben, sondern sie ganz nahe oder besser noch in den Mittelpunkt des zu beleuchtenden Distriktes legen müssen. Bei dem Wechselstromsystem dagegen sind wir im stande, mit unserer Station aus der Stadt herauszugehen in eine Nachbarschaft, deren Einwohner in Bezug auf Lärm und Erschütterungen nicht so empfindlich sind. Ferner handelt es sich um die ganze Ausdehnung des zu beleuchtenden Gebietes, um die Möglichkeit mit Wasser zu arbeiten oder nicht, um die Kosten von Kohlen und Wasser, um die Beschaffenheit derselben, um die Möglichkeit, Kondensationswasser zu erhalten, und um viele andere Dinge, welche in Betracht gezogen werden müssen.

Wenn wir es mit einem dichten Beleuchtungsgebiet zu thun haben, wo die meisten Lampen innerhalb einiger hundert Meter (oder allenfalls innerhalb eines Radius von ungefähr 1000 Meter) von der Centrale entfernt installiert werden können, so ist das Gleichstromsystem im allgemeinen das beste. Einer der grössten Vorteile dieses Systems liegt in dem Umstande, dass wir die Dynamomaschinen durch Akkumulatorenbatterien ergänzen und die letzteren während der Stunden des geringsten Strombedarfs allein benutzen können. Aus ökonomischen Gründen sind wir gezwungen, Verbundmaschinen zu gebrauchen; aber wie wir wissen, arbeitet eine Verbundmaschine unökonomisch, wenn sie nur leicht belastet ist, vorausgesetzt, dass sie ohne Kondensation läuft, und es ist deshalb vorteilhaft, in den frühen Morgenstunden und tagsüber die Maschinen stillzusetzen, so dass die Akkumulatoren während dieser Zeit allein die wenigen erforderlichen Lampen speisen. In dieser Hinsicht besitzt der Gleichstrom einen bedeutenden Vorteil; aber dieser Vorteil wird weniger und weniger fühlbar in dem Masse, in welchem die gesamte Stromabgabe

der Station wächst, weil in einer grossen Station die Zahl der Lampen selbst in den Tagesstunden genügen wird, um eine kleine Maschine nahezu voll zu belasten, und wenn wir Kondensationswasser erhalten können, so wird die Maschine selbst bei schwacher Belastung noch verhältnismässig ökonomisch arbeiten.

Ein Punkt, der gegenwärtig auch zu Gunsten des Gleichstromes spricht, besteht in der Bequemlichkeit, mit welcher derselbe für motorische Zwecke gebraucht werden kann; doch haben wir alle Aussicht, dass über kurz oder lang Wechselstrommotoren mit praktischem Erfolge konstruiert werden können. Ausserdem ist der Gebrauch von Motoren in städtischen Leitungen noch nicht so populär geworden, dass wir Ursache hätten, diesem Punkte grosses Gewicht beizulegen. Der Hauptvorteil des Wechselstromsystems ist der, dass wir Kabel von geringem Querschnitt verwenden und dennoch die Spannung im ganzen Verteilungsgebiet fast völlig konstant halten können. Bei Gleichstrom brauchen wir nicht nur mehr Kupfer in den Haupt- und Speiseleitungen, sondern wo die Speiseleitungen lang sind, beträgt der Spannungsverlust in ihnen bisweilen nicht weniger als 20% der Gesamt- oder Stationsspannung, und in solchen Fällen werden kompliziertere Anordnungen für die Regulierung der Spannung notwendig, um die Spannung an den Speisepunkten wenigstens annähernd konstant zu halten.

Es giebt nun zwei Wege, auf denen wir Transformatoren gebrauchen können. Wir können die Hochspannungs-Hauptleitungen in das Haus jedes einzelnen Konsumenten führen und ihm seinen eigenen kleinen Transformator geben, oder wir können grosse Transformatoren in bestimmten Unterstationen aufstellen und ein zweites System von Niederspannungs-Hauptleitungen mit Hausanschlüssen durch die Strassen verlegen, in derselben Weise, wie wenn die Versorgung durch Gleichstrom geschähe, nur dass in diesem Falle Niederspannungs-Hauptleitungen nicht so lang zu sein brauchen, da wir ja so viele Unterstationen einrichten können, als wir nur wünschen, und so die Entfernung der Lampen auf jede gewünschte Grenze vermindern können. Das System eines besonderen Transformators für jeden Konsumenten ist bis jetzt am meisten angewendet worden, aber es ist nicht das beste. Allerdings sparen wir hierdurch die Kosten der sekundären Hauptleitungen und die Kosten für die Unterstationen, ein Umstand, der für eine in der Entwicklung begriffene Gesellschaft von grosser Wichtigkeit ist, weil die Konsumenten wenige und weit voneinander entfernt sind. Andererseits sind die Einwände gegen den Gebrauch besonderer Transformatoren gross, und zumal gegenwärtig, wo die Verwendung des elektrischen Lichtes zunimmt, erhalten diese Einwände erhöhte Bedeutung. Vor

allen Dingen liegt eine Gefahr darin, dass jeder Konsument einen Hochspannungsapparat in seinem Hause hat. Wir können unseren Transformator allerdings in den Keller setzen und ihn in einem feuersicheren Kasten verschliessen, aber wenn wir Tausende von Transformatoren in ebenso vielen Häusern haben, so ist die Möglichkeit vorhanden, dass in einem oder in zwei Fällen das Verschliessen vergessen wird und irgend eine unberufene Person eine Hochspannungsklemme berührt. Ein weiterer Einwand besteht darin, dass eine Anzahl kleiner Transformatoren mehr Geld kostet und mehr Energie nutzlos verzehrt als ein einziger grosser Transformator. Nehmen wir z. B. zwanzig Häuser an, von denen jedes mit fünfzig Lampen ausgestattet ist. Jedes muss demnach seinen 50 Lichter-Transformator erhalten. Alle fünfzig Lampen werden nicht jeden Tag gleichzeitig brennen. Wahrscheinlich wird jeder Transformator nicht öfter als ein halb Dutzend mal im Jahre mit voller Belastung arbeiten, und dabei haben wir den Hysteresisverlust, der Tag und Nacht ohne Unterbrechung stattfindet. Dieser Verlust bedeutet Energieverschwendung und Wärmeentwicklung; thatsächlich habe ich von einem Falle gehört, in welchem die Wärme, die ein in einem Weinkeller aufgestellter Transformator entwickelte, genügend war, um den Keller das ganze Jahr über in einer ganz angenehmen Temperatur zu erhalten. Die allgemeine Erfahrung lehrt uns, dass kaum mehr als die Hälfte oder höchstens 60 % der in einem Gebiete installierten Lampen gleichzeitig brennen. Der maximale Strombedarf für unsere zwanzig Häuser wird deshalb niemals 600 Lampen überschreiten, und wir können für die zwanzig getrennten Transformatoren von je fünfzig Lichtern einen einzigen Transformator von 600 Lichtern einsetzen. Nach dem, was ich früher über den Einfluss der Grösse auf die Kosten der Transformatoren gesagt habe, sehen wir, dass der eine grosse Transformator kaum mehr als ein Drittel des Geldes kosten wird, das für die zwanzig kleinen erforderlich ist, und dass selbst wenn wir zwei grosse Transformatoren aufstellen, um nämlich einen in Reserve zu haben, wir dies für wenig mehr als die Hälfte des Geldes thun können. Gleichzeitig ist der Energieverlust durch Hysteresis auf ein Viertel des früheren Betrages vermindert worden, und dies ist ein sehr wichtiger Umstand. Nehmen wir z. B. eine Centralstation an, welche für 20 000 Lampen entworfen ist, von denen aber nur 60 %, also 12 000, während der zwei oder drei Stunden des Maximalbedarfes gleichzeitig zu brennen pflegen. Die durchschnittliche Brenndauer jeder installierten Lampe beträgt in London ungefähr 500 Stunden pro Jahr. Wenn wir bei kleinen Transformatoren einen Verlust von 2 % durch Hysteresis zulassen, so wird die Energie, welche von allen an die Centrale ange-

geschlossenen Transformatoren dauernd verzehrt wird, gleichwertig mit derselben sein, die 20000 · 0,02 oder 400 Lampen zu ihrem Betriebe erfordern. In einem Jahre verbrauchen wir dann nutzlos nicht weniger als

$$400 \cdot 24 \cdot 365 \text{ oder rund } 3500000$$

Lampenbrennstunden, während unser Einkommen von den 20000 Lampen nur 20000 · 500 oder 10000000 Lampenbrennstunden beträgt. Das bedeutet, dass selbst, wenn keine anderen Verlustquellen als die Hysteresis vorhanden wären, wir von unserer Centrale Energie für 13500000 Lampenbrennstunden aussendeten, aber nur für 10000000 Lampenbrennstunden bezahlt bekämen. Wir erhalten demnach nur

$$\frac{10000000}{13500000} \cdot 100 \text{ oder nur } 74\%$$

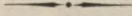
Nutzeffekt. Gesetzt nun, wir verwendeten Unterstationen und grosse Transformatoren, so wird der Hysteresisverlust auf 1% herun-
terfallen und der Nutzeffekt wird sich auf über 90% erheben. Wir können ferner den Nutzeffekt dadurch verbessern, dass wir in der Unterstation nicht nur einen Transformator, sondern zwei oder noch mehr von verschiedener Grösse aufstellen und Anordnungen treffen, welche je nach dem Strombedarf die beiden Stromkreise in der Hoch- und Niederspannungsleitung der Transformatoren ein- oder ausschalten, sodass während der Stunden der geringsten Belastung der Hysteresisverlust nur in dem kleinsten Transformator der aufgestellten Gruppe stattfindet. Herr Ferranti, Herr Gordon und ich selbst haben unabhängig voneinander einen Apparat angegeben, welcher die Transformatoren selbstthätig ein- und ausschaltet.

Die Anwendung grosser Transformatoren in Unterstationen hat noch den weiteren Vorteil, dass die Gesamtlänge der Hochspannungsleitungen hierdurch beträchtlich vermindert wird und die Zweigverbindungen an diesen Hauptleitungen fortfallen. Wir sind so imstande, eine höhere Isolation zu erhalten. Wir wissen, dass in einem gleichförmigen Kabel leicht eine Isolation von vielen Hundert Megohm pro Kilometer erreicht werden kann, dass aber, nachdem das Kabel verlegt ist und Zweigverbindungen gemacht worden sind, die Isolation viel niedriger ist; der Grund hierfür liegt darin, dass die Isolation an jedem Abzweigpunkte erst entfernt und dann wieder hergestellt werden muss. Nun ist es aber durchaus nicht einerlei, ob die Isolation in der Kabelfabrik hergestellt wird, wo jede nur mögliche Vorsichtsmassregel getroffen werden kann, um eine vor-

zügliche Arbeit zu gewährleisten, oder ob man dieselbe Arbeit in einem Graben oder in einer Höhle auf offener Strasse ausführt. Niemals kann die unter solchen Verhältnissen hergestellte Isolation, selbst wenn wir mit grösster Sorgfalt vorgehen, so gut ausfallen wie die, welche von den Bewickelungsmaschinen in der Kabelfabrik ausgeführt wird. Aus diesem Grunde muss ein System einfacher Hauptleitungen, welche von der Centrale strahlenförmig nach den Unterstationen ausgehen, eine höhere Isolation zeigen als ein kompliziertes Netzwerk von Hauptleitungen, welche das ganze Beleuchtungsgebiet durchziehen.

Ich habe hier die Hauptgründe für die Annahme von Transformatoren-Unterstationen in Verbindung mit Wechselstromverteilung angegeben; wenn wir sie aber auf jeden gegebenen Fall anwenden wollen, so dürfen wir nicht vergessen, die finanzielle Grundlage in Rechnung zu ziehen. Ein Verteilungssystem kann wissenschaftlich das beste sein; dennoch ist nicht gesagt, dass es auch finanziell das beste ist. So wird gegenwärtig in London für Wechselstromcentralen allgemein das Verteilungssystem angewendet, welches auf Einzeltransformatoren für jeden Konsumenten beruht, nicht etwa, weil es theoretisch das beste, sondern einfach, weil es unter den gegenwärtigen Umständen finanziell das einzig mögliche System ist. Ich bezweifle jedoch nicht, dass, sobald der Lichtverbrauch erst allgemeiner wird, die verschiedenen Gesellschaften es vorteilhafter finden werden, zu dem System mit Unterstationen überzugehen. Ich habe bis jetzt noch nichts über das Verhältnis der Kosten einer Gleichstrom- und Wechselstromcentrale zu einander gesagt, und es ist tatsächlich sehr schwierig, dieses Verhältnis in irgendwie bestimmter Weise festzustellen. Die Kosten für die Kessel, die Dampfmaschinen und die Nebenapparate werden bei beiden Systemen ungefähr gleich sein. Die Wechselstrommaschinen werden etwas billiger ausfallen als die Gleichstrommaschinen; ausserdem werden auch die Kosten der Akkumulatorenbatterie gegen das Gleichstromsystem sprechen. Andererseits dürfen wir aber nicht vergessen, dass die gesamte Maschinenleistung etwas geringer sein kann, da ja die Akkumulatoren in den Stunden des grössten Lichtbedarfs die Maschinen unterstützen. Vergleichen wir so eins mit dem anderen, so finden wir, dass zwischen den beiden Systemen in Bezug auf die Anlagekosten der Centrale kein sehr grosser Unterschied herrscht. Der Unterschied liegt hauptsächlich ausserhalb der Centralstation. Wenn das Versorgungsgebiet gross ist, so pflegen die Extrakosten für die schweren Speiseleitungen und die Hauptkabel bei Gleichstrom viel grösser zu sein als die für die Hochspannungs-Speiseleitungen und die Niederspannungs-Hauptleitungen bei Wechselstrom, und der

bleibende Überschuss pflegt mehr als hinreichend zu sein, um die Transformatoren in den Unterstationen zu bezahlen. Wenn das Gebiet dagegen klein ist und grosse Konsumdichte besitzt, so wird sich die Wage auf die andere Seite neigen. Die Kosten der Hauptleitungen werden bei beiden Systemen ungefähr dieselben sein, aber wir werden nicht imstande sein, an Kosten für die Speiseleitungen soviel zu sparen, dass wir von dem Überschuss die Transformatoren bezahlen können. Jeder Fall muss jedoch auf seine besonderen Verhältnisse untersucht werden, und was ich hier vergleichsweise über die Kosten gesagt habe, soll nur dazu dienen, sich in dem betreffenden Falle ein Urteil bilden zu können.



Kapitel IX.

Beispiele ausgeführter Centralstationen.

Als Beispiele zur Illustration des im vorigen Kapitel Gesagten wähle ich drei Typen von Centralstationen, welche sich durch die Art der verwendeten Antriebskraft wesentlich voneinander unterscheiden. Die Antriebskraft ist in der ersten der beschriebenen vier Anlagen Dampf, in der zweiten und dritten Wasser und in der vierten Elektrizität.

1. Die Sardinia Street-Centrale der Metropolitan Electric Supply Company. — Die Kessel gehören der Babcock-Wilcox-Type an und sind im Erdgeschoss aufgestellt. Die Kesselbatterie liegt parallel zu den zwei Reihen Dampfmaschinen, welche sich in dem angrenzenden Raume auch im Erdgeschoss, aber auf etwas erhöhtem Fundamente befinden. Diese Anordnung der Kessel und Dampfmaschinen hat den grossen Vorteil, dass sie die Länge der Dampfleitung vermindert und so die Unzuträglichkeiten, welche von einem Fehler in der Dampfleitung herrühren, wesentlich verringert. Die Dampfrohre bilden eine sogenannte Ringleitung und sind an geeigneten Punkten mit Absperrventilen versehen, sodass jede beliebige Länge der Röhrenleitung abgetrennt werden kann, ohne die Versorgung mit Dampf durch den übrigen Teil der Leitung zu stören. Unter dem Kesselraum und mit diesem durch einen Schienenweg verbunden befindet sich ein weiter Kohlenraum, eine sehr praktische Anordnung, zumal in einer Centrale, welche, wie hier an der Sardinia Street, in einem Distrikt liegt, wo die Kohlen nur durch Wagen angeliefert werden können und wo infolgedessen die Lieferung zur Zeit heftigen Frostwetters und Nebels für Tage und Wochen unterbrochen wird. Die Dampfmaschinen gehören der Verbundtype der Westinghouse-Schnellläufer an und treiben mittelst Riemen Westinghouse-Wechselstromdynamos an, die in einem Obergeschoss aufgestellt sind. Längs einer Wand im Maschinenraum befindet sich das Schaltbrett, mit Hilfe dessen jede gewünschte Verbindung zwischen den Dynamos und den äusseren Stromkreisen schnell hergestellt werden kann. Während der Stunden geringen Strombedarfs werden alle Strom-

kreise auf eine oder zwei Maschinen geschaltet; in dem Masse, wie die Belastung dann zunimmt, werden andere Maschinen angelassen und einige der Stromkreise auf diese umgeschaltet. Die Maschinen arbeiten nicht in Parallelschaltung. Was die Hauptleitungen anbetrifft, so muss ich eine sinnreiche Einrichtung erwähnen, welche von Herrn Bailey, dem Ingenieur der Gesellschaft, herrührt. Um nämlich die Schwierigkeiten zu vermeiden, welche mit der Isolation der Abzweigpunkte verbunden sind, wenn diese in den Strassen ausgeführt werden, macht Herr Bailey, so weit als möglich, alle Anschlüsse an die Hochspannungs-Hauptleitungen mit Hilfe von Verbindungsklemmen auf dem Grundstücke des Konsumenten. Bei dieser Anordnung wird die Isolation nur an den Enden entfernt, welche die Klemmen tragen und welche vollkommen isoliert werden können. Allerdings wird durch diese Anordnung die Gesamtlänge des erforderlichen Kabels etwas vergrössert, nämlich um die Länge der Einbiegung, die in jedes Haus gelegt ist; dies ist jedoch nur ein kleiner Bruchteil des Gesamtverlaufes der Hauptleitungen. Ferner haben wir den Vorteil, dass jedes Haus sozusagen durch doppelte Hauptleitungen, nämlich eine auf jeder Seite, mit Strom versorgt wird und dass deshalb der Hausanschluss nicht unterbrochen ist, selbst wenn eine Länge der Hauptleitungen losgetrennt wird. Wir haben hier thatsächlich das elektrische Äquivalent zu der Ringleitung zwischen den Dampfmaschinen und Dampfkesseln.

2. Die Centrale in Lynton. — Diese wird durch Wasserkraft von dem Flusse Lyn bei einem Gefälle von 29 *m* betrieben. Das Wasser, welches die Turbine speist, wird durch eine 16 *cm* weite Röhre zugeleitet. Dem grossen Gefälle entsprechend, ist die Tourenzahl hoch genug, um die Wechselstrommaschinen, welche der Mordey-Type angehören, direkt, und zwar auf jeder Seite der Turbine eine, zu kuppeln. Jede Dynamo entwickelt bei Vollbelastung 37,5 Kilowatt. Die Tourenzahl wird durch eine Schieberklappe, welche sich in dem Hauptzuleitungsrohr befindet, mittels Handrades geregelt. Die Leitung besteht aus unterirdisch verlegten Bleikabeln.

3. Die Centrale in Keswick. — Diese arbeitet ebenfalls mit Wasserkraft, welche der Fluss Greta liefert; da das Gefälle jedoch nur 6 *m* beträgt, so werden die Wechselstrommaschinen durch Riemen von der Turbinenwelle aus angetrieben. Die Anlage umfasst zwei 30 Kilowatt-Maschinen von der Kapp'schen Type, die nötige Erregermaschine, Schaltbretter und Messinstrumente, ausserdem einen Dampfkessel und eine Westinghouse-Dampfmaschine als Hilfskraftquelle für den Fall, dass die Wasserkraft bei zu grosser Trockenheit oder bei Frost ausser Thätigkeit tritt. Die Leitung besteht aus isolierten Drähten, welche oberirdisch an Ölisolatoren geführt sind;

über eine gewisse Entfernung hin mussten sie unterirdisch verlegt werden, und zwar geschah dies nach dem Brookes'schen Röhrensystem.

4. Die Centrale in Kassel. — Diese ist ein Beispiel für eine Centralstation, wo die Elektrizität die Antriebskraft bildet. In der Stadt befinden sich zwei Stationen, in welchen Gleichstrommaschinen von Kapp'schen Wechselstrommaschinen, die hier als Motoren arbeiten, angetrieben werden. Der Wechselstrom wird von einer 6,5 km entfernten Wasserkraftstation geliefert. Fig. 29 zeigt die Anordnung der Centrale schematisch. In der Kraftstation treibt eine Turbine zwei Kapp'sche Wechselstromdynamos, W_1 und W_2 , deren jede 30 Ampère bei 2200 Volt Spannung liefert.

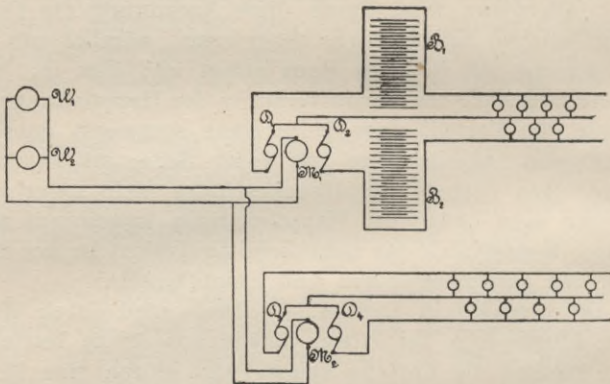
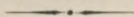


Fig. 29.

Die Maschinen sind parallel geschaltet, und der Strom wird durch ein konzentrisches Bleikabel nach Kassel geleitet, wo das Kabel sich in zwei Zweige teilt, deren jeder zu einer Lichtstation führt. In jeder der beiden Lichtstationen ist ein 60 Kilowatt-Wechselstrommotor M_1 und M_2 direkt gekuppelt mit zwei 30 Kilowatt-Gleichstromdynamos D_1, D_2 und D_3, D_4 , die für 110 Volt Spannung gewickelt sind, und zwar eine Dynamo auf jeder Seite des Motors. Die Dynamos sind nach dem Dreileitersystem geschaltet und arbeiten auf ein Dreileiternetz, welches beiden Stationen gemeinsam ist. Auf einer der Stationen befindet sich auch eine Akkumulatorenbatterie B_1, B_2 , von welcher die Stadt während der Stunden geringsten Strombedarfs versorgt wird. Gegen Abend, wenn es nötig ist, die Akkumulatoren durch die Dynamos zu unterstützen, oder wenn man die Akkumulatoren wieder zu laden wünscht, werden die Dynamos auf

das Netz geschaltet und erhalten Strom von den Akkumulatoren. Der Akkumulatorenstrom setzt sie also in Bewegung und lässt sie so lange als Motoren laufen, bis der von ihnen angetriebene Wechselstrommotor synchron mit der von der Turbine angetriebenen Wechselstromdynamo läuft. In diesem Augenblicke wird der Wechselstrom eingeschaltet; hiermit kehrt sich nun zugleich die Thätigkeit der Maschinen um, da jetzt der Wechselstrommotor wirklich als Motor arbeitet und als solcher die mit ihm gekuppelten Dynamos antreibt. Die beiden Stationen liefern gegenwärtig Strom für 2600 gleichzeitig brennende oder 2500 installierte sechzehnkerzige Glühlampen; es ist jedoch Vorsorge getroffen, dass die Anlage bis auf 12 000 angeschlossene Glühlampen ausgedehnt werden kann.



Kapitel X.

Parallelschalten von Wechselstrommaschinen.

Ich habe schon darauf hingewiesen, dass es aus ökonomischen Gründen ratsam ist, die Maschinen in einer Centrale so weit als möglich mit ihrer vollen Belastung laufen zu lassen, und es ist leicht einzusehen, dass diese Bedingung erfüllt werden kann, wenn wir die Wechselstrommaschinen in Parallelschaltung arbeiten lassen. Denn wäre es nur möglich, jede Maschine ganz unabhängig von den anderen Maschinen zu betreiben, so würden wir gezwungen sein, eine grössere Zahl von Maschinen aufzustellen, welche mit schwacher Belastung arbeiten, und da die Stunden mit geringer Belastung diejenigen mit voller Belastung an Zahl weit übertreffen, so würden die Maschinen unter sehr unökonomischen Bedingungen laufen. Wenn wir jedoch die Dynamos parallel schalten können, so sind wir im stande, genau in Übereinstimmung mit dem Strombedarf Maschinen ein- und auszuschalten, sodass unsere Maschinen jederzeit einigermassen günstig belastet sind. Noch vor einigen Jahren glaubte man, dass die Wechselstrommaschinen für Parallelschaltung besonders konstruirt werden müssten, und gewisse Fabrikanten beanspruchten diese Eigenschaft ihrer Maschinen als etwas Besonderes, das zu Gunsten ihrer Konstruktion spräche. Wenn das Parallelschalten gelang, so schrieb man es deshalb der besonderen Type der Wechselstromdynamo zu; gelang es nicht, so betrachtete man den Entwurf der Maschine als fehlerhaft. Erst in neuester Zeit sind wir zu der Einsicht gekommen, dass die wahre Schwierigkeit des Parallelschaltens ganz und gar nicht in der Wechselstrommaschine, sondern vielmehr in der Betriebsmaschine liegt. Irgend zwei beliebige Wechselstromdynamos arbeiten, wenn sie von Turbinen mit absolut konstanter Winkelgeschwindigkeit angetrieben werden, anstandslos in Parallelschaltung; wenn wir aber die Dynamos durch langsam laufende Dampfmaschinen mittelst Riemen oder Seile antreiben, so wird jede Unregelmässigkeit in der Winkelgeschwindigkeit der Maschinen wegen der Vervielfachung der Tourenzahl durch die

Transmission vergrößert, und die zu einer anderen parallel geschaltete Wechselstrommaschine arbeitet infolgedessen abwechselnd als Generator und als Motor, während der Übergang von einem Zustande in den anderen von schweren mechanischen und elektrischen Unzulänglichkeiten begleitet ist, die ein glattes Arbeiten völlig unmöglich machen. Die Bedingung für erfolgreiches Zusammenarbeiten in Parallelschaltung besteht deshalb in Verwendung einer direkt gekuppelten Dampfmaschine, welche eine sehr gleichförmige Winkelgeschwindigkeit besitzt. Dies ist ein Punkt von grosser praktischer Wichtigkeit und er ist eng verknüpft mit der allgemeinen Frage in Betreff der Verwendung von Wechselstromdynamos als Motoren; denn wenn die Dampfmaschine im Begriffe ist, ihre gleichförmige Winkelgeschwindigkeit zu verlieren, so schreitet die Wechselstrommaschine sofort ein und zwingt die Dampfmaschine, sie aufrecht zu erhalten. Die Wechselstromdynamo wirkt thatsächlich für einen Augenblick als Motor und kontrolliert so den Gang der Dampfmaschine.

Kapitel XI.

Wechselstrommotoren.

Wenn wir die Arbeitsübertragung für Wechselstrom untersuchen, so können wir den Stromkreis als aus drei Teilen bestehend betrachten, nämlich aus einer Leitung, welche einen bestimmten Widerstand hat, aus einer Wechselstrommaschine, welche als Generator am einen Ende arbeitet, und einer zweiten Wechselstrommaschine, welche als Motor am anderen Ende arbeitet. Eine derartige Auffassung würde zwar sehr einfach sein, jedoch ist sie nicht die beste, weil wir hierdurch gezwungen sind, das Verhalten beider Maschinen gleichzeitig zu untersuchen. Um die Behandlung zu vereinfachen, will ich den folgenden Fall annehmen: Gegeben sei ein Paar Klemmen, zwischen welchen wir auf irgend eine Weise eine konstante (aber natürlich nach dem Sinusgesetze sich ändernde) elektromotorische Kraft bei konstanter Frequenz aufrecht erhalten; ferner soll die Stromquelle, von welcher wir diese elektromotorische Kraft erhalten, so reichlich bemessen sein, dass wir jeden beliebigen Energiebetrag von den Klemmen nehmen oder in sie hineinschicken können, ohne auch nur irgendwie die Spannung oder die Frequenz zu ändern. Solch ein Klemmenpaar würden z. B. die Sammelschienen in einer Centralstation sein, wenn wir von ihnen aus einen kleinen Motor speisen. Gesetzt, der Motor liefе bis zu synchronem Gange hinauf an und würde dann auf die Sammelschienen geschaltet. Wir wollen nun die Beziehung wissen zwischen der abgegebenen mechanischen Arbeit, dem Ankerstrom und der Feldstärke. Diese anscheinend schwierige Aufgabe kann graphisch, und zwar mit Hilfe eines Vektordiagramms, sehr einfach gelöst werden.

Es ist selbstverständlich, dass wir nur dann Arbeit vom Motor erhalten können, wenn er mit einer solchen Geschwindigkeit läuft, dass die Frequenz der in seiner Ankerwicklung erzeugten elektromotorischen Kraft dieselbe ist wie diejenige des den Motor treibenden Stromes, und dass die elektromotorische Kraft des Motors dem zugeführten Strome entgegengesetzt gerichtet sein muss.

Wir müssen deshalb zuerst irgend eine äussere Kraftquelle anwenden, um den Motor auf die richtige Geschwindigkeit zu bringen, ehe wir ihn einschalten. Wie sollen wir aber wissen, wann die richtige Geschwindigkeit erreicht ist? Kein Tachometer oder Tourenzähler kann uns hierüber hinreichend genaue Auskunft geben, besonders da ja kleine Änderungen in der Frequenz des Stromes vorhanden sein können, der den Motor speisen soll. Wenn wir zwei Wechselstrommaschinen parallel schalten wollen, so müssen wir auch genau wissen, wann ihre Phase und Frequenz übereinstimmt, und zu diesem Zwecke brauchen wir ein Instrument, welches man »Phasenindikator« nennt. Derselbe besteht im wesentlichen aus zwei kleinen Transformatoren (Fig. 30), deren Primärspulen an die Klemmen der beiden parallel zu schaltenden Wechselstrommaschinen gelegt sind. Zwei von diesen Klemmen können natürlich dauernd verbunden sein, wie die Figur auch zeigt;

die anderen beiden dürfen jedoch nur mittels des Ausschalters S verbunden werden, wenn die Maschinen synchron laufen. Ferner zeigt die Figur die Schaltung der Sekundärspulen der beiden Transformatoren; diese enthalten die beiden Phasenlampen. Wenn wir die Schaltung verfolgen, so können wir leicht erkennen, dass wenn die beiden Maschinen sich in entgegengesetzter Phase befinden, d. h. in dem Zustande, in dem wir sie nicht parallel schalten dürfen, keine elektromotorische Kraft in den Lampen auftritt, dass aber

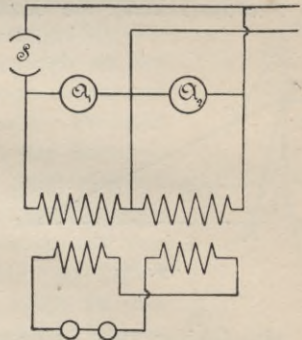


Fig. 30.

wenn die Maschinen gleiche Phase haben, die Lampen die volle elektromotorische Kraft der beiden in Serie geschalteten Transformatoren erhalten. Wir sehen demnach, dass die Maschinen ihren Synchronismus noch nicht erreicht haben, wenn die Lampen dunkel sind, dass sie dagegen synchron laufen, wenn die Lampen aufleuchten. Aber vollständige Dunkelheit oder vollständige Helligkeit können nur eintreten, wenn die Frequenzen genau gleich sind. Im allgemeinen werden die Frequenzen verschieden sein, und die Lampen werden infolgedessen flackern. Gesetzt also, eine Maschine lief schon mit normaler Tourenzahl und die andere würde angelassen, so werden die Lampen zuerst sehr stark flackern. Je mehr aber die Tourenzahl der zweiten Maschine wächst, um so weniger heftig wird das Flackern, und allmählich, nämlich in dem Massstabe, wie sich die Tourenzahl dem synchronen Laufe nähert, treten regelmässige

Schwingungen in dem Lichte der Lampen auf, welche länger und länger werden. Wir warten nun einen günstigen Augenblick ab und schalten in der Mitte einer Schwingung, also wenn die Lampen hell aufleuchten, ein. Die Maschinen laufen dann so nahe synchron, dass der erste Stromstoss sie völlig »in Tritt« bringt; in diesen Zustand eingeklemmt, verharren sie mit einer gewissen Kraft. Die elektrische Kupplung ist thatsächlich mit einem Eisenklemmen zu vergleichen, welches ebenso sicher ist, als wenn zwei Ankerwellen durch Keilnuträder miteinander verbunden sind. Um die Zuverlässigkeit dieses elektrischen Einklemmens zu prüfen, habe ich eine 60 und eine 10 Kilowatt-Maschine mit Parallelschaltung laufen lassen, wobei ich die Antriebskraft von zwei unabhängigen Kraftquellen bezog. Darauf nahm ich die Antriebskraft von der kleinen Maschine fort. Sie liefen genau ebenso wie vorher. Dann legte ich eine Belastung auf die kleine Maschine und steigerte dieselbe bis auf 25 Pferdestärken; die Maschine lief immer noch.

Mit dieser Belastung liess ich die Maschine mehrere Stunden laufen, nahm sie plötzlich ab und legte schliesslich einen grossen Teil der Belastung wieder auf; immer blieb die Maschine in Tritt. Natürlich giebt es für jede Maschine eine bestimmte Belastung, bei welcher sie ausser Tritt fällt, gerade so, wie es für jedes Keilnuträd eine Belastung giebt, welche die Reibung in den Nuten überschreitet und

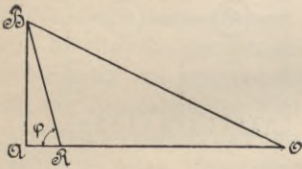


Fig. 31.

so ein Gleiten der Reibungsräder herbeiführt. Bei der Maschine, mit welcher ich Versuche anstellte, würde es möglich sein, den Synchronismus durch eine Belastung von ungefähr 30 Pferdestärken, d. h. durch das Doppelte der normalen Belastung, zu zerstören; jedoch war ich nicht im stande, diese Überlastung durch Versuche zu ermitteln, weil der Riemen, welcher die Arbeit von dem Motor abnahm, schon bei 25 Pferdestärken zu gleiten anfang. Die Maschinen, mit welchen ich diese Versuche anstellte, gehören meiner eigenen Type an; dies ist jedoch, wie ich schon früher sagte, keine besondere, in dem Entwurfe begründete Eigenschaft, sondern jede neuere Wechselstrommaschine, welche einen weichen Eisenkern und einen guten Nutzeffekt besitzt, wird sich ebenso verhalten.

Nachdem ich nun einige praktische Ergebnisse über Parallelschalten und über Arbeitsübertragung mitgeteilt habe, muss ich kurz auf die Theorie derselben eingehen. Figur 31 stellt den Fall dar, dass eine Maschine in einen induktionsfreien Widerstand Strom schiebt. OB ist die elektromotorische Kraft, welche die Maschine

bei ihrer augenblicklichen Erregung in den offenen Stromkreis liefern würde, AB die elektromotorische Kraft, welche nötig ist, um die Selbstinduktion der Maschine bei der augenblicklichen Stromstärke zu überwinden, ferner AR die elektromotorische Kraft, welche den Ankerwiderstand zu überwinden hat, und schliesslich RO die elektromotorische Kraft, welche für den äusseren Stromkreis zur Verfügung steht. Wenn wir z. B. in einer Centralstation schon eine Anzahl Maschinen in Parallelschaltung laufen liessen, so würde OR die elektromotorische Kraft an den Sammelschienen sein, und wenn wir jetzt eine neue Maschine einschalten wollten, so müssen wir sie, um sie unter denselben Verhältnissen wie die übrigen Maschinen laufen zu lassen, so stark erregen, dass sie in den offenen Stromkreis die elektromotorische Kraft OB liefern würde. Wir lassen die Maschine bis zur richtigen Frequenz hinauf anlaufen und schalten sie ein. Um der vorliegenden Untersuchung willen will ich annehmen, dass die neue Maschine mit einer der anderen Maschinen derartig mechanisch verbunden werden könnte, dass ihre elektromotorische Kraft im Vergleich zu der elektromotorischen Kraft der Sammelschienen um irgend einen gewünschten Winkel vor- oder nachsteht. So stellt in Fig. 32 OR die elektromotorische Kraft der Sammelschienen und OB diejenige der Maschine dar, während der Winkel zwischen beiden durch die mechanische Kupplung konstant gehalten wird. Zeichnen wir aus OR und OB das Parallelogramm ORCB, so finden wir die resultierende elektromotorische Kraft in der neuen Maschine gleich der Strecke OC, und OC können wir wieder als die Resultierende der elektromotorischen Kraft CD der Selbstinduktion und der in dem Ankerwiderstande verloren gehenden elektromotorischen Kraft OD auffassen. Wenn wir den Selbstinduktionskoeffizienten als konstant annehmen, so ist der Winkel ψ , den OD mit OC bildet, der gleiche wie der, den in Fig. 31 RA mit RB bildet; auf diese Weise ist also die Richtung von OD in Fig. 32 zugleich bestimmt. Den Punkt D finden wir dann, wenn wir von C auf OD das Lot fallen. Da nun OD die in dem Ankerwiderstande verzehrte elektromotorische Kraft darstellt, und da wir ferner den Widerstand selbst kennen, so ist es leicht, die Stromstärke der Maschine zu berechnen. Wir kennen dann die Richtung und die Grösse sowohl der Stromstärke als auch der elektromotorischen Kraft, sodass wir die von der Maschine geleistete Arbeit finden können. Zu diesem Zwecke multiplizieren wir die Stromstärke mit der elektromotorischen Kraft und mit dem Cosinus des Winkels, den die Stromstärke und die elektromotorische

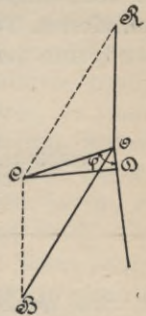


Fig. 32.

Kraft miteinander bilden. Die so gefundene Arbeit tragen wir auf der Geraden OB oder ihrer Verlängerung ab. Nun wollen wir unsere mechanische Kupplung ändern und in derselben Weise die Stromstärke und Arbeit für einen anderen Winkel zwischen der elektromotorischen Kraft der Sammelschienen und der Maschine bestimmen. Wenn wir die Konstruktion für verschiedene Phasenwinkel wiederholen, so erhalten wir die in Fig. 33 veranschaulichten Kurven, welche Stromstärke und Arbeit als Funktionen des Phasenwinkels zeigen. Die äussere Kurve links stellt die von der als Generator laufenden Maschine gelieferte Arbeit dar, wenn ihr Phasenwinkel von 0° bis ungefähr 180° zurückbleibt; die innere Kurve links stellt die von der als Motor laufenden Maschine verbrauchte Arbeit dar, wenn ihr Phasenwinkel von 180° bis 360° zurückbleibt. Die Kurven auf der rechten Seite stellen in ähnlicher Weise die an die Sammelschienen abgegebene oder von ihnen gelieferte Arbeit dar. Wir bemerken, dass ungefähr die Hälfte der Kurven punktiert ist. Die punktierten Teile beziehen sich auf einen schwankenden Arbeitszustand, und das Diagramm zeigt auf einen Blick, warum es unmöglich

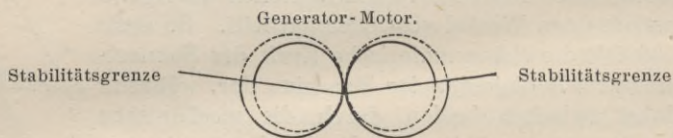


Fig. 33.

ist, zwei Wechselstrommaschinen in Serienschaltung laufen zu lassen, wenn sie unabhängig voneinander angetrieben werden, d. h. wenn sie nicht mechanisch miteinander gekuppelt sind; dass dies letztere der Fall sei, habe ich ja nur angenommen, um erklären zu können, wie dieses Diagramm erhalten wird. Wir sehen ferner, dass ein mässiger Unterschied in dem Phasenwinkel genügt, um die Maschine aus einem starken Generator in einen starken Motor umzuwandeln. Der Unterschied in der Lage beträgt in beiden Fällen ungefähr 90° , doch müssen wir daran denken, dass das Diagramm für eine zwei-polige Maschine gilt. In Wirklichkeit werden die Maschinen aber vielpolig hergestellt, sodass der Winkel viel kleiner wird. Wenn wir z. B. achtzehn Pole haben, so würde der Winkel nur ungefähr 10° betragen, und dieser Umstand legt uns klar, warum es für Parallelschaltung und ebenfalls für Arbeitsübertragung unter Anwendung von Wechselstrommaschinen wesentlich ist, Betriebsmaschinen zu wählen, welche den Dynamos eine fast absolut konstante Winkelgeschwindigkeit erteilen.

Kapitel XII.

Von selbst angehende Wechselstrom-Motoren.

Aus dem bisher Gesagten geht hervor, dass man durch einen einzigen Wechselstrom zwar ohne Schwierigkeit Arbeit übertragen kann, dass aber der Motor nicht von selbst angeht. Das System wird also dadurch verwickelt, dass man eine besondere Maschine aufstellen und für einen Arbeitsvorrat sorgen muss, um den Motor anzulassen. Der einfachste Weg ist der, dass man die Erregermaschine hierzu benutzt und sie durch eine Akkumulatorenbatterie treibt. Wenn die Wechselstrommaschine dann als Motor arbeitet, so treibt sie ihre eigene Erregermaschine mit um, und dies kann nun ausser zum Erregen der Feldmagnete des Wechselstrommotors auch gleichzeitig benutzt werden, um die Akkumulatoren wieder zu laden, so dass diese für das nächste Anlassen des Motors bereit sind. Die Komplikation und Kosten dieser Anordnung sind keine sehr ernstesten Einwände, wenn wir mit grossen Arbeitsmengen zu rechnen haben; für die Verteilung kleiner Arbeitsmengen giebt jedoch der Umstand, dass man ausser dem Motor selbst auch noch eine Erregermaschine und eine Akkumulatorenbatterie braucht, zu Bedenken Anlass. Es sind deshalb mannigfache Versuche gemacht worden, einen von selbst angehenden Wechselstrommotor zu konstruieren. Einer von diesen, und ich kann gleich hinzufügen der erfolgreichste, rührt von Herrn Zipernowsky her, dessen Firma (Ganz & Co., Budapest) mehrere dieser Maschinen auf der Frankfurter Ausstellung (1891) in Betrieb vorführte. Bei der beschränkten Zeit, die mir zur Verfügung steht, versuche ich nicht, eine eingehende Beschreibung dieser Motoren zu geben oder in die vielen Feinheiten der Konstruktion einzudringen, welche bei der praktischen Entwicklung dieser Maschinen für nötig befunden wurden. Ich muss mich damit zufrieden geben, das Prinzip derselben darzulegen. In Fig. 34 bedeutet M einen unterteilten Magneten und A einen Anker, welcher mit einer einzigen Spule bewickelt ist; die Enden dieser Spule sind mit einem zerteiligen Kommutator verbunden. Es ist in Wirklichkeit die wohlbe-

kannte Siemens'sche Induktorwicklung, wie sie auch in dem kleinen Griscom-Motor verwendet wird, und der in Fig. 34 dargestellte Apparat ist nichts anderes als eine sehr einfache Form eines Gleichstrommotors, der in fast jeder Lage von selbst angeht. Die einzige Lage, in welcher der Motor nicht von selbst angeht, ist die, wo der Anker so steht, dass die Bürsten auf jeder Seite beide Kommutatorsegmente gleichzeitig berühren. Um den Motor in dieser Lage angehen zu lassen, muss man natürlich die Bürsten nach der einen oder anderen Seite vom toten Punkte etwas verschieben. Nach dem, was ich in Kapitel I gesagt habe, erkennen wir nun leicht, dass diese Art von Motoren auch mit Wechselstrom angeht und arbeitet, dass jedoch die Zugkraft zuerst sehr gering sein wird. Wir wollen jetzt beobachten, was sich ereignen wird, wenn wir den Wechselstrom einschalten, ohne den Motor zu belasten. Er wird angehen und seine

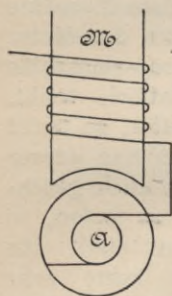


Fig. 34.

Tourenzahl wird, wie bei allen Serienmotoren, zunehmen. Wenn wir es nun mit Gleichstrom zu thun hätten, so würde der Motor sehr bald anfangen, »durchzugehen«; bei Wechselstrom kann dieses jedoch nicht eintreten, weil der Anker, wenn er versucht, in jenes Tempo zu gelangen, diejenige Tourenzahl passieren muss, welche der Frequenz des zugeführten Wechselstromes entspricht. In dem Augenblicke, wo dies stattfindet, fällt die durch den zeitweiligen Kommutator hervorgebrachte Stromumkehr genau mit der Umkehr des zugeführten Stromes zusammen, und das Resultat besteht darin, dass der durch den Anker fließende Strom seine Richtung überhaupt

nicht mehr ändert. Der Anker ist also bei Eintritt des synchronen Laufes in einen Feldmagneten umgewandelt, der mit Gleichstrom erregt wird, und was beim Angehen der Feldmagnet war, ist jetzt der Anker einer gewöhnlichen Wechselstrommaschine geworden. Der Augenblick, in dem die Maschine in »Tritt« kommt, kann leicht an dem Verhalten der Bürsten erkannt werden. Beim Angehen geben diese nämlich starkes Feuer und ein eigentümliches Geräusch. In dem Masse, wie dann die Tourenzahl des Motors wächst, nimmt auch das Feuern der Bürsten ab, und plötzlich giebt es einen Ruck, nach dem sowohl Geräusch als Funken aufhören; hierauf kann die Belastung aufgelegt werden. Wenn dann der Motor erst in Tritt ist, kann er selbst eine beträchtliche Überlastung aushalten, ohne stehen zu bleiben.

Kapitel XIII.

Mehrphasenströme.

Der eben beschriebene Motor geht zwar von selbst an, aber nur ohne Belastung. Das Feuern ist auch ein Grund, der die Verwendung dieser Maschine in Kornmühlen, ferner in Baumwollspinnereien und überhaupt in Betrieben verbietet, wo eine Explosion durch Funken verursacht werden kann. Wir können diesen Motor deshalb nicht als die endgiltige Lösung der Aufgabe, Arbeit durch Wechselstrom zu übertragen, betrachten, sondern müssen die Lösung in einer ganz anderen Richtung suchen. Diese Richtung ist zuerst von Professor Galileo Ferraris in Turin vor ungefähr sechs Jahren angegeben worden.

Ganz unabhängig von Ferraris wurde diese Entdeckung auch von Nikola Tesla in New-York gemacht, und nachdem die praktische Bedeutung der Entdeckung erkannt worden war, ist eine ganze Schar von ursprünglichen Entdeckern hervorgetreten, von denen jeder beansprucht, dass er der erste gewesen sei. Mit diesen mannigfachen Ansprüchen brauchen wir uns hier nicht zu befassen. Ich will allein den von Ferraris benutzten Apparat beschreiben. Er verwendete zwei vertikale Spulen AB (Fig. 35), welche einen rechten Winkel miteinander einschlossen, und einen Kupfercylinder C, der zwischen ihnen hing. Nun wurden zwei Wechselströme von derselben Frequenz, aber mit einem Phasenunterschied von 90° , durch die beiden Stromkreise geschickt, und der Kupfercylinder wurde hierdurch in Drehung versetzt. Die Erklärung lautet folgendermassen: Jede Spule für sich genommen, erzeugt ein oscillierendes magnetisches Feld, dessen Kraftlinien rechtwinklig zur Oberfläche der Spule stehen. Die beiden Spulen zusammen erzeugen ein resultierendes Feld, welches sich um die Vertikalachse des Apparates

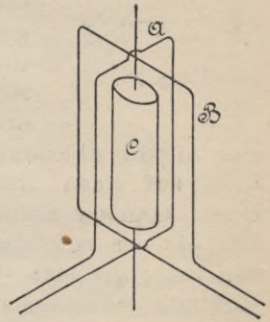


Fig. 35.

dreht, d. h. ein sogenanntes »Drehfeld«. Die Oberfläche des Kupfercylinders wird deshalb dauernd von Kraftlinien geschnitten, da diese rund herum streichen; es werden infolgedessen in dem Kupfer Ströme induziert, welche nach dem Lenz'schen Gesetze in solchen Richtungen verlaufen, dass sie sich der Bewegung widersetzen. Da nun der Cylinder frei aufgehängt ist, so hat sein Bestreben, sich der Bewegung des Feldes zu widersetzen, das Resultat, dass er sich selbst in Bewegung setzt.

Wenn wir diesen Laboratoriumsversuch nun in die Praxis übertragen wollen, so müssen wir natürlich viele Änderungen und Verbesserungen an dem Modell vornehmen. Vor allem müssen wir Eisen anwenden, um einen kompakteren und stärkeren Apparat zu erhalten. Ferner müssen wir die beiden Spulen unterteilen, um eine Maschine zu erhalten, welche mit geringer Tourenzahl läuft, und schliesslich müssen wir für den einfachen Kupfercylinder einen besonders gewundenen Anker an die Stelle setzen. Eine nach diesen Angaben entworfene Maschine wird, allgemein gesagt, eine

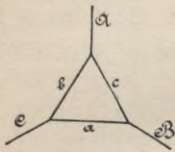


Fig. 36.

grosse Verbesserung gegenüber dem ursprünglichen Apparat bedeuten, in einer Hinsicht jedoch wird sie nicht so gut sein. In Fig. 35 stehen die Spulen rechtwinklig, und die Ströme sind ebenfalls rechtwinklig. Wie wir an dem Modell gesehen haben, ist die Folge dieser Kombination ein absolut konstantes magnetisches Feld, welches sich mit konstanter Geschwindigkeit um die Achse dreht. Wenn wir aber die beiden Spulen in

eine Anzahl Abteilungen zerlegen und diese abwechselnd dicht bei dicht auf einen cylindrischen Kern wickeln, gerade so wie bei einem Gramme-Ringe, so ist eine unserer Bedingungen, nämlich die der rechtwinkligen Lage der beiden Spulen zu einander, verloren gegangen; denn jetzt liegen die Spulen nahezu in einer Richtung miteinander um den ganzen Cylinder herum, und die Folge davon ist, dass das Feld keineswegs mehr absolut konstant ist. Ich kann dies mit Hilfe des Modells nachweisen. Wenn wir nämlich die beiden Drahtwindungen schiefwinklig zu einander stellen, so sehen wir sofort, dass der Vektor des resultierenden Feldes nicht mehr der Radius eines Kreises, sondern einer Kurve ist, welche einer Ellipse gleicht. Um die Änderung in der Stärke des resultierenden Feldes zu finden, brauchen wir nur die beiden Stromkurven zu zeichnen und ihre Ordinaten zu addieren, wie ich schon in Kapitel I zeigte. Das Feld ist jetzt nicht nur ein rotierendes, sondern es pulsiert auch. Die Rotierung ist das, was wir wünschen, aber die Pulsierung ist störend, da infolge

derselben nutzlose Ströme in den Ankerdrähten erzeugt werden, welche Wärme, aber keine Arbeit liefern. Es ist nun das grosse Verdienst des Herrn von Dobrowolsky, diesen Nachteil in den Maschinen, deren Konstruktion auf dem Tesla-Ferraris-Motor beruht, zuerst klar erkannt zu haben. Nachdem dann das Übel einmal gefunden war, war auch bald ein Heilmittel gefunden. Dobrowolsky nahm, anstatt zwei um 90° , drei um je 120° gegeneinander verschobene Ströme und verminderte auf diese Weise die Pulsierung des Feldes auf ungefähr 14 %; aber auch dieses Ergebnis befriedigte ihn noch

nicht. Er ging deshalb einen Schritt weiter und ordnete die Feldwindungen in solcher Weise an, dass sie die Wirkung von sechs verschiedenen Strömen hervorbrachten, ohne jedoch mehr als drei Drähte für die Zuleitung zum Motor zu gebrauchen. Ein Blick auf Fig. 36 wird dies klar machen. Es möge a b c die drei Spulen eines zweipoligen Trommelankers darstellen, z. B. derart wie

sie in dem Anker einer Thomson-Houston-Maschine gewickelt sind; anstatt aber die Spulen an einen gemeinsamen Mittelpunkt und an einen dreiteiligen Kommutator zu legen, wie es in dieser Maschinentype geschehen ist, wollen wir sie verbinden wie Fig. 36 es zeigt, und annehmen, dass die Verbindungspunkte ABC drei Schleifringe seien, durch welche die drei um je 120° gegeneinander verschobenen Ströme von der Fernleitung aufgenommen werden.

Dem Kirchhoff'schen Satze entsprechend, muss dann die algebraische Summe der drei Ströme ABC jederzeit gleich Null sein, denn wenn dies nicht der Fall wäre, so würde eine Anhäufung von Elektrizität in der Maschine stattfinden, und das ist natürlich unmöglich. Jeder der Ströme kann deshalb als die Resultierende der beiden anderen Ströme aufgefasst werden. Hier haben wir eine einfache Dreiphasenwicklung und ein rotierendes magnetisches Feld, dessen Pulsierungen ungefähr 14 % seiner Minimalstärke betragen. Um nun diese Pulsierung zu vermindern, schlägt Dobrowolsky folgenden Weg ein: Anstatt die Verbindung zwischen b und c

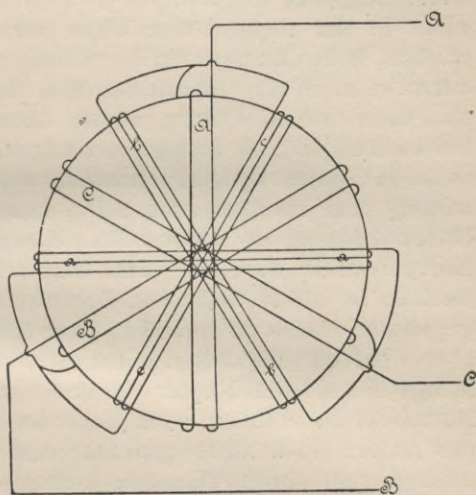


Fig. 37

direkt an den Schleifring A zu legen, setzt er an die Verbindungsstelle einen dickeren Draht an und wickelt diesen in einer mitten zwischen b und c gelegenen Spule um den Anker. In gleicher Weise wird B so gewickelt, dass es die Phasendifferenz zwischen a und c teilt, und ebenso wird C zwischen a und b gewickelt. Wir haben jetzt sechs Spulen auf dem Anker, aber nur die halbe Phasendifferenz wie früher zwischen den benachbarten Spulen, d. h. also eine Phasendifferenz von je 60° . Fig. 37 zeigt eine derartige Wicklung für einen zweipoligen Anker, und auf diese Weise ist die Pulsierung auf ungefähr 3 % vermindert. Wenn die Wicklung nicht in der angegebenen Weise zerteilt wäre, so würde das Bestreben, Schwankungen in der Stärke des resultierenden Feldes hervorzurufen, in dem induzierten Teile der Wicklung Ströme erzeugen, und diese Ströme würden wieder bis zu einem gewissen Grade die Schwankungen des Feldes verhindern. Aber da sie notwendigerweise in Spulen verlaufen müssen, welche infolge ihrer Lage rechtwinklig zum resultierenden Felde keinen Beitrag zum Drehmoment liefern können, so stellen diese Ströme einfach einen so grossen Energieverlust dar, als dem Ohm'schen Widerstande entspricht. Deshalb ist die Methode von Dobrowolsky, die Wicklung in der angegebenen Weise zu zerteilen, zwar nicht unumgänglich notwendig, aber wohl ein nützlicher Kunstgriff, um die aus einer gegebenen Menge Eisen und Kupfer zu erzielende Leistung und damit den Nutzeffekt zu erhöhen. Ich habe den in Fig. 37 dargestellten Teil des Motors einen Anker genannt; dies geschah jedoch nur, um die Analogie mit einem Thomson-Houston-Anker zu veranschaulichen. Es würde richtiger sein, diesen Teil, welcher die drei Wechselströme von der Leitung empfängt, das Feld zu nennen, weil ihm die Funktion zufällt, das magnetische Drehfeld zu erzeugen. Der Anker der Maschine ist ein Hohlcylinder aus unterteiltem Eisen, welcher nach der üblichen Weise aus dünnen Scheiben aufgebaut und ausserdem mit einer in sich kurzgeschlossenen Wicklung versehen ist. Um das Prinzip dieser Wicklung zu verstehen, denken wir uns einen Grammeschen Ring, dessen Wicklung in folgender Weise geändert ist: Anstatt das innere Ende jeder Spule mit dem äusseren Ende der nächsten Spule zu verbinden, wodurch eine Spiralwicklung entstehen würde, wollen wir die beiden Enden jeder Spule miteinander verbinden. Wir haben dann den Gramme-Kern mit einer Anzahl verschiedener Spulen bedeckt, die in sich selbst kurzgeschlossen sind. Nun bringen wir einen Feldmagneten in den inneren Raum des hohlen Ankers und versetzen diesen Magnet in Umdrehung. Die Pole, welche an den geschlossenen Ankerspulen vorbeistreichen, werden sehr starke Ströme in ihnen induzieren, und die mechanische

Rückwirkung dieser Ströme auf die Pole wird die Aufwendung eines beträchtlichen Kräftepaars oder Drehmomentes erfordern, um eine selbst nur mässige Tourenzahl aufrecht zu erhalten. Hiervon können wir uns leicht selbst mit Hilfe einer Gleichstromdynamo überzeugen. Wir erregen zu diesem Zwecke ihr Feld mit fremdem Strome und schliessen die Bürsten durch einen dicken Draht kurz. Wenn wir dann den Anker mit der Hand drehen, so finden wir, dass derselbe selbst unter Aufwendung bedeutender Kraft nur langsam herumkriecht, und wir können daraus schliessen, ein wie grosses Drehmoment durch eine geringe Winkelgeschwindigkeit des Ankers in Bezug auf den Feldmagneten entwickelt werden kann. Dies ist eine wichtige Thatsache, welche uns dazu verhilft, zwei mit den Drehfeldmotoren verknüpfte Erscheinungen zu verstehen. Die erste ist die, dass die Tourenzahl eines solchen Motors sich nur wenig ändert, wenn die Belastung variiert, da ja kleine Änderungen in der relativen Geschwindigkeit zwischen Feld und Anker grosse Änderungen im Drehmomente und damit in der Zugkraft hervorrufen, und die zweite ist die, dass das Drehmoment, also auch die Zugkraft, beim Anlassen des Motors sehr gross ist, weil ja beim Anlassen die relative Geschwindigkeit zwischen Anker und Feld ein Maximum ist. Es ist jedoch notwendig, hier zu bemerken, dass man, um diese grosse Zugkraft zu erhalten, Widerstand in den Ankerstromkreis einschalten muss; denn ohne diesen würde der Strom im Anker so stark werden, dass er das Drehfeld entmagnetisieren und so wieder die Zugkraft vermindern würde. Wir gehen jetzt zu Fig. 37 zurück und wollen sehen, wie wir unsere Betrachtungen praktisch verwerten können. Wir haben schon gesehen, wie ein Dreiphasenstrom, wenn er durch die Feldwicklung geschickt wird, ein merklich konstantes Feld erzeugt, das sich mit einer der Frequenz entsprechenden Geschwindigkeit um den Mittelpunkt dreht. Der Anker umgiebt den in Fig. 37 gezeichneten Teil, er ist jedoch aus der Abbildung fortgelassen. Die Kraftlinien des Feldes induzieren, indem sie an den Ankerdrähten vorbeistreichen, in diesen sehr starke Ströme, und die mechanische Rückwirkung dieser Ströme auf die Kraftlinien des Feldes sucht den Anker mit grosser Kraft in Umdrehung zu versetzen. Wenn der Anker beweglich wäre, so würde er in Drehung geraten. Aber in der Maschine, die ich hier beschreibe, steht der Anker fest, während sich der Feldmagnet, d. h. der in Fig. 37 gezeichnete Teil, drehen kann. Wir haben dann ein Kräftepaar zwischen Anker und Feld; der Anker kann sich nicht bewegen, also muss das Feld sich bewegen. Wir wollen nun sehen, welches die Wirkung dieser Bewegung ist. Gesetzt, es sei die Richtung der Ströme derartig, dass sie, wenn der innere Teil der

Maschine sich in Ruhe befindet, eine ruckweise Drehung der Kraftlinien hervorbringen. Die Drehungsgeschwindigkeit zwischen den Kraftlinien und den Drähten entspricht natürlich immer der Frequenz. Wenn die Drähte feststehen, so drehen sich die Kraftlinien in Bezug auf irgend einen festen Punkt im Raume (z. B. in Bezug auf die feststehenden Ankerdrähte) mit der vollen Geschwindigkeit, wie sie durch die Frequenz gegeben ist, sagen wir mit dreissig Umdrehungen pro Sekunde, wenn die Frequenz dreissig ist und unsere Maschine für zwei Pole, wie in Fig. 37, gewickelt ist. Jeder Ankerdraht wird deshalb dreissigmal von einem nordmagnetischen und dreissigmal von einem südmagnetischen Felde in jeder Sekunde geschnitten werden, und das erzeugte Drehmoment wird die innere Feldtrommel in entgegengesetzter Richtung ruckweise in Bewegung setzen. Sagen wir z. B., dass die innere Trommel mit zwanzig Umdrehungen pro Sekunde rückwärts läuft. Die relative Geschwindigkeit zwischen der inneren Trommel und den Kraftlinien beträgt natürlich noch dreissig Umdrehungen pro Sekunde; von diesen dreissig Umdrehungen kommen aber zwanzig Umdrehungen auf die Rückwärtsbewegung der Trommel, sodass nur noch zehn Umdrehungen vorwärts gerichteter Geschwindigkeit für die Kraftlinien in Bezug auf irgend einen festen Punkt im Raume übrig bleiben. Die Ankerdrähte werden jetzt nur noch zehnmal von einem nordmagnetischen und zehnmal von einem südmagnetischen Felde pro Sekunde geschnitten. Wenn wir der Trommel noch schneller zu laufen gestatten, so wird die Geschwindigkeit, mit der die Kraftlinien geschnitten werden, noch weiter vermindert. Wenn die innere Trommel z. B. so leicht belastet ist, dass sie eine Geschwindigkeit von neunundzwanzig Umdrehungen erreichen kann, so wird die absolute Geschwindigkeit des Feldes in Bezug auf den Anker auf eine Umdrehung vermindert, und jeder Ankerdraht wird nur einmal von einem nordmagnetischen und einmal von einem südmagnetischen Felde pro Sekunde geschnitten werden. Wir sehen daher, dass, je geringer die Belastung auf dem Motor ist, er desto schneller laufen wird, und dies ist genau dieselbe Bedingung, wie wir sie beim Gleichstrommotor finden. Beim Anlassen, wenn die Trommel in Ruhe ist, haben wir die grösste Zugkraft, und in dem Masse, wie die Geschwindigkeit wächst, nimmt die Zugkraft ab. Dies ist eine sehr wichtige Eigenschaft des Dreiphasenmotors, da ja infolgedessen die Maschine nicht nur ein von selbst angehender Motor wird, sondern ein solcher, der sogar mit grosser Belastung angehen wird. Wie gross die Belastung beim Angehen des Motors sein darf, hängt von der mehr oder weniger geschickten Konstruktion des Motors ab. Es finden, wie ich schon oben andeutete, gewisse Rückwirkungen des Ankers

auf das Feld statt, welche die Zugkraft beim Anlassen zu verringern suchen; der Gegenstand ist jedoch zu schwierig und verwickelt, als dass ich ihn in der kurzen, mir zur Verfügung stehenden Zeit behandeln könnte. Ich habe nur einen blossen Umriss von der Wirkungsweise dieser Maschinengruppe gegeben, sodass der Leser im allgemeinen das Prinzip derselben verstehen kann.

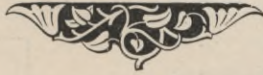
Der Unterschied in der Geschwindigkeit der Trommel und des Feldes wird technisch als die »magnetische Gleitung« des Motors bezeichnet, und wenn wir daher eine genügende Annäherung an eine konstante Tourenzahl erreichen wollen, so müssen wir einen Anker mit kleinem Widerstande anwenden. Hier haben wir wieder eine enge Übereinstimmung zwischen dem Dreiphasenmotor und einem gewöhnlichen Gleichstrommotor mit Nebenschlusswicklung oder mit besonders erregtem Magnetfelde. In Wirklichkeit überschreitet die magnetische Gleitung niemals 10 %; gewöhnlich liegt sie zwischen 3 und 5 %. Dies bedeutet, dass die Tourenzahl des Motors sich nur um 5 % zwischen Vollbelastung und Leerlauf ändert.

In der Maschine, welche ich beschrieben habe, ist der innere sich drehende Teil der Feldmagnet; aber es ist leicht verständlich, dass die Konstruktion der Maschine auch umgekehrt werden könnte, wenn wir nämlich den äusseren Ring zum feststehenden Feldmagneten und die innere Trommel zum sich drehenden Anker machen würden. Diese Anordnung wird thatsächlich für kleine Drehfeldmotoren angewendet, weil wir auf diese Weise die sonst nötigen Schleifkontakte gänzlich vermeiden; aber sie hat den Nachteil, dass sie den Verlust durch Hysteresis vergrössert, wie folgende Überlegung zeigt: Ich habe schon nachgewiesen, dass die Geschwindigkeit, mit der das magnetische Feld das Ankereisen schneidet, sehr gering ist, nämlich der Geschwindigkeit der magnetischen Gleitung entspricht, während hingegen die Geschwindigkeit, mit welcher das Feld sich durch das Eisen des Feldmagneten bewegt, der Frequenz entspricht, also ungefähr zwanzigmal so gross ist, wie die Geschwindigkeit des Feldes im Ankereisen. Der Hysteresisverlust im Anker ist deshalb geringfügig im Vergleich zu demjenigen des Feldmagneten, und es ist daher natürlich vorteilhaft, im Feldmagneten weniger Eisen zu haben als im Anker; dies erreichen wir aber dadurch, dass wir die innere Trommel zum Feldmagneten und den äusseren Hohlzylinder zum Anker machen. Bei kleinen Maschinen dagegen, wo der Nutzeffekt nicht von so wesentlicher Bedeutung ist, wählen wir die entgegengesetzte Anordnung wegen ihrer grösseren Einfachheit und wegen der geringeren Kosten.

Der Dreiphasenmotor hat seinen beiden Rivalen, nämlich dem gewöhnlichen Gleichstrommotor und dem gewöhnlichen Wechselstrommotor, gegenüber mehrere Vorzüge, weil er in gewissem Sinne die guten Eigenschaften beider in sich vereinigt. Er ist dem Gleichstrommotor wegen seiner grösseren Einfachheit vorzuziehen. Wir haben keinen Kollektor und keine Bürsten. Es kann kein Feuern eintreten, sodass der Motor ohne Bedenken in Kohlenbergwerken und an anderen Stellen gebraucht werden kann, wo eine zum Feuern geneigte Maschine gefährlich sein würde. Thatsächlich hat Tesla schon derartige Motoren für Kohlenschneidemaschinen gebaut. Die grössere Einfachheit und stärkere Konstruktion macht den Dreiphasenmotor auch geeignet zur Anwendung auf dem Schiffsdeck und anderen Plätzen, wo er einer rauhen Behandlung ausgesetzt ist. Es würde z. B. ohne Schwierigkeit ausführbar sein, eine Dreiphasenmaschine zu entwerfen, welche anstandslos arbeitet, selbst wenn sie ganz mit Seewasser durchtränkt ist. Ein weiterer Vorteil besteht darin, dass die Entfernung, über welche Arbeit zu übertragen ist, bedeutend vergrössert werden kann. Bei gewöhnlichen Gleichstrommotoren ist diese Entfernung beschränkt, weil wir diese Maschinen besonders für kleine Arbeitsleistungen, nicht für hohe Spannungen bauen können. Bei einer Dreiphasenmaschine ist die Grenze in Bezug auf die Spannung nicht so eng, oder es ist jedenfalls immer möglich, mit Transformatoren zu arbeiten, indem wir die Spannung auf der Erzeugerstation erhöhen und sie auf der Verbrauchsstation wieder erniedrigen; dabei ist zu erwähnen, dass diese Transformation mit sehr geringem Verluste ausgeführt werden kann. So betrug z. B. bei der Lauffener Arbeitsübertragung die Spannung des Generators, von einer oder drei Klemmen an Erde gemessen, nur 50 Volt, während die Spannung jedes Drahtes der Fernleitung, in gleicher Weise gemessen, 160 mal oder bei einigen Versuchen sogar 320 mal so gross war wie die des Generators.

Gewöhnliche Wechselstrommaschinen ermöglichen es natürlich mit derselben Leichtigkeit, Arbeit bei hoher Spannung zu übertragen und sie bei niedriger Spannung zu verbrauchen; aber sie bieten nicht dieselbe Leichtigkeit bei der Verteilung der Arbeit in kleinen Motoren, weil jeder Motor mit einer besonderen Quelle elektrischer Energie zum Anlassen und zur Felderregung versehen sein muss. Auch wird von Herrn von Dobrowolsky beansprucht, dass das gesamte Kupfergewicht besser ausgenutzt wird, wenn es in drei Drähten für den Dreiphasenstrom angeordnet ist, als in zwei Drähten für einen Einphasenstrom; über diesen Punkt jedoch kann ich meine Meinung nicht aussprechen, da ich ihn noch nicht untersucht habe. Einer der Einwände gegen den Dreiphasenstrom ist der, dass er für den

Motor keine veränderliche Tourenzahl zulässt, was für viele Zwecke, besonders für Zugarbeit (z. B. bei elektrischen Strassenbahnen), eine unumgängliche Notwendigkeit ist. Dies ist ohne Zweifel ein ernster Einwand; aber wir dürfen wohl erwarten, dass die Männer, welche einige 200 Pferdestärken auf eine Entfernung von 180 *km* mit Erfolg übertragen haben, mit der Zeit auch diese Aufgabe lösen werden.



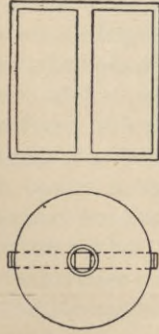


Fig. 1.

Eisen 44 kg
Kupfer 204 »
Hysteresisverl. . . 1,3 %

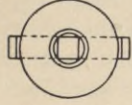


Fig. 3.

Eisen 41 kg
Kupfer 73 »
Hysteresisverl. . . 1,35 %

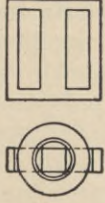


Fig. 5.

Eisen 46 kg
Kupfer 32 »
Hysteresisverl. . . 1,50 %

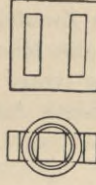


Fig. 7.

Eisen 49 kg
Kupfer 18 »
Hysteresisverl. . . 1,7 %

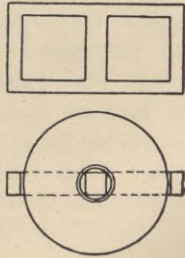


Fig. 2.

Eisen 45 kg
Kupfer 154 »
Hysteresisverl. . . 1,45 %

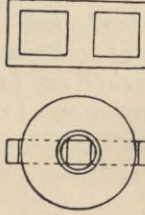


Fig. 4.

Eisen 48 kg
Kupfer 54 »
Hysteresisverl. . . 1,57 %

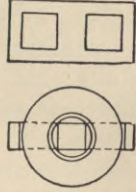


Fig. 6.

Eisen 54 kg
Kupfer 24 »
Hysteresisverl. . . 1,74 %

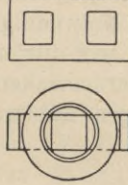


Fig. 8.

Eisen 70 kg
Kupfer 11 »
Hysteresisverl. . . 2,2 %

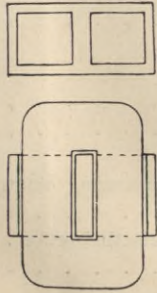


Fig. 9.

Eisen 43 kg
Kupfer 53 »
Hysteresisverl. . . 1,3 %

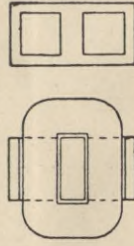


Fig. 11.

Eisen 47 kg
Kupfer 27 »
Hysteresisverl. . . 1,55 %

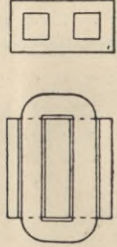


Fig. 13.

Eisen 54 kg
Kupfer 15 »
Hysteresisverl. . . 1,77 %

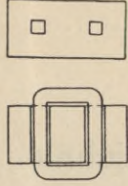


Fig. 15.

Eisen 52 kg
Kupfer 9 »
Hysteresisverl. . . 2,24 %

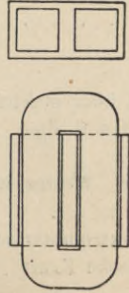


Fig. 10.

Eisen 48 kg
Kupfer 42 »
Hysteresisverl. . . 1,53 %

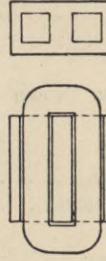


Fig. 12.

Eisen 52 kg
Kupfer 22 »
Hysteresisverl. . . 1,7 %

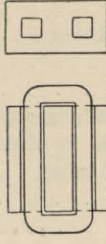


Fig. 14.

Eisen 61 kg
Kupfer 12 »
Hysteresisverl. . . 1,94 %

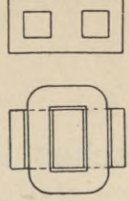


Fig. 16.

Eisen 78 kg
Kupfer 7 »
Hysteresisverl. . . 2,55 %

Massstab in Millimetern.
0 500 1000
100 200 300 400 500 600 700 800 900 1000

Alphabetisches Inhaltsverzeichnis.

	Seite
Akkumulatorenbatterie zum Anlassen von Motoren	75
Anker.	
Dreiphasenmotoranker	79
Hysteresisverluste im Anker	41
Kernlose Anker	43
Anker ohne Draht	48
Spaltung der Ankerwicklung zur Vermeidung von Wirbelströmen	46
Vorteil von Eisenkernen im Anker	43
Wechselstrommaschinenanker	34
Arbeit des Wechselstroms	17
Arbeitsübertragung	70
Theorie der Arbeitsübertragung	72
Augenblickliche Werte der Stromstärke und Spannung	10
Bailey's Leitungssystem	65
Blakesley	15, 17
Brown, C. E. L.	
Dreiphasenmaschine von Brown	41
Dobrowolsky.	
Motor von Dobrowolsky	79
Drehfeld der Mehrphasenmotoren	78
Dreiphasenstrom.	
Dreiphasenstromdynamos	40, 44
Dreiphasenstrommotoren	78
Einwände gegen die Dreiphasenstrommotoren	85
Vorteile der Dreiphasenstrommotoren	84
Drosselspule	4
Elektrische Ströme.	
Konventionelle Ansicht über elektrische Ströme	1
Richtung der elektrischen Ströme	1
Elektromotorische Kraft.	
Ausdruck für die in Wechselstrommaschinen erzeugte elektromotorische Kraft	38
Beziehung zwischen elektromotorischer Kraft und Selbstinduktion	28
Effektive elektromotorische Kraft	16

	Seite
Elektromotorische Kraft der gegenwärtig gebauten Wechselstrom- maschinen	37
Formel für die maximale elektromotorische Kraft	32
Koeffizient der elektromotorischen Kraft	39
Mittlere elektromotorische Kraft	22
Elektromotorische Kraft der Selbstinduktion	11
Sinuskurve der elektromotorischen Kraft	5
Trapezförmige Kurve der elektromotorischen Kraft	37
Entwurf von Wechselstrommaschinen	40
Ewing über Hysterisis	43
Feldintensität	32
Feldstärke oder totale Induktion	32
Feldstärke in der Mordey-Maschine	47
Ferranti's Wechselstrommaschine	45
Ferraris. Motorenmodell von Professor Galileo Ferraris	77
Fleming's Diagramm	14
Frequenz	4
Wirkung der Erniedrigung der Frequenz auf Motoren	28
Ganz'scher Motor	29, 75
Gegenkraft, elektromotorische	28
Graphische Darstellung des Wechselstroms	4
Hysterisis	41
Mittel zur Verringerung des Hysterisisverlustes	42
Verluste durch Hysterisis	43
Verluste in Kilowatt	42
Impedanz	14
Induktanz	14
Induktion. Änderung der Induktion	8
Totale Induktion	32
Kapp's Wechselstrommaschine	47
Kennedy's Wechselstrommaschine	49
Kerntransformatoren	54
Kerne von Wechselstrommaschinen	40
Kingdon-Maschine	48
Koeffizient der elektromotorischen Kraft von Wechselstrommaschinen	38
Zahlenwerte dieses Koeffizienten	39
Koeffizient der Selbstinduktion	10
Kollektor. Vorteil der Abwesenheit von Kollektoren in Wechselstrommaschinen	44
Kraftlinien, magnetische	8

	Seite
Leiter in Wechselstrommaschinen	40
Vorsichtsmassregeln für Leiter	40
Luftzwischenraum, durch Anwendung von Eisenankern vermindert	44
Magnetische Gleitung	83
Magnetische Reibung oder Hysteresis	42
Magnetische Streuung	52
Wirkung der magnetischen Streuung auf Transformatoren	52
Magnetpole der Wechselstrommaschinen	34
Einfluss der Magnetpolform auf die Gestalt der Spannungskurven	35
Gleiche Stärke der Magnetpole in der Ferranti-Maschine	45
Lowrie-Hall-Type der Magnetpole	34
Westinghouse-Type der Magnetpole	34
Manteltransformatoren	54
Maximalleistung	26
Analytische Ableitung für die Maximalleistung	29
Graphische Darstellung der Maximalleistung	27
Mehrphasenströme	77
Messung von Spannung, Stromstärke und Arbeit	15
Meritens-Wechselstrommaschine	43
Mordey-Maschine	46
Motor von Dobrowolsky	79
» » Ganz	29, 75
» » Tesla-Ferraris	77
Motor-Transformator	50
Parallelschaltung von Wechselstrommaschinen	68
Theorie der Parallelschaltung	72
Periode des Wechselstroms	17
Permeabilität, magnetische	9
Phase	6
Phasenindikator	71
Phasenverschiebungswinkel der Stromstärke gegen die Spannung	18
» » der Spannung gegen die Stromstärke	10
Pulsierung des Feldes bei Mehrphasenmotoren	79
Selbstinduktion.	
Elektromotorische Kraft der Selbstinduktion	11
Erscheinungen der Selbstinduktion	11
Koeffizient der Selbstinduktion	10
Siemens.	
Wechselstrommaschine	43
Dynamometer	16
Spannung.	
Effektive Spannung	16, 19
Mittlere Spannung	22
Spannungsmesser von Cardew	15
Messung der Spannung im Instrument von Cardew	15

	Seite
Steinmetz über Hysterese	43
Stromstärke.	
Effektive Stromstärke	16, 20
Mittlere Stromstärke	17, 20
Stromwage von W. Thomson	16
Swinburne's Igeltransformator	53
Tesla-Motoren	78
Nikola Tesla	77
Thomson, William, Stromwage	16
Thomson, Elihu.	
E. Thomson über Wirbelströme	41
E. Thomson's Versuche mit Ankerspulen	47
Thomson-Houston-Wechselstrommaschine	47
Transformatoren	50
Änderung der elektromotorischen Kraft der Transformatoren	52
Grosse Transformatoren	60
Igeltransformatoren	53
Kerntransformatoren	54
Kleine Transformatoren	59
Magnetische Streuung in Transformatoren	53
Manteltransformatoren	54
Motortransformatoren	50
Temperatur der Transformatoren	56
Transformatorenunterstationen	59
Transformationsverhältnis	52
Wirkungsweise der Transformatoren	50
Beziehungen zwischen den Abmessungen verschiedener Transformatoren derselben Type	55
Unterstationen	59
Vektordiagramm	6
Voltmeter zur Messung der mittleren Stromstärke	16
Wärme.	
Vom Wechselstrom entwickelte Wärme zur Strom- und Spannungsmessung	35
Watt.	
Scheinbare Watt	18
Wahre Watt	18
Wattmeter von Ganz	18
Korrektion für das Wattmeter	25
Theorie des Wattmeters	24
Wechselströme.	
Graphische Darstellung von Wechselströmen	4
Sinuskurve von Wechselströmen	5
Vektordiagramm von Wechselströmen	6

	Seite
Vereinigung von zwei Wechselströmen	6
Verteilung von Wechselströmen	57
Zeuner-Diagramm von Wechselströmen	6
Wechselstromdynamos oder Wechselstromgeneratoren	45
Brown	40, 44
Ferranti	45
Kapp	47
Kennedy	49
Kingdon	48
Lowrie Hall	34
Meritens	43
Mordey	46
Siemens	43
Thomson-Houston	47
Westinghouse	47
Wechselstrommaschinen	31
Einfache Form einer Wechselstrommaschine	31
Entwurf von Wechselstrommaschinen	40
Kerne von Wechselstrommaschinen	40
Kernlose Wechselstrommaschinen	43
Leiter in Wechselstrommaschinen	40
Mechanische Konstruktion von Wechselstrommaschinen	40
Parallelschaltung	68
Reihenschaltung	74
Vergleich mit Gleichstrommaschinen	33
Versuche mit parallel geschalteten Wechselstrommaschinen	72
Wechselstrommotoren.	
Anlassen der Motoren	29, 67
Dreiphasenmotoren	78
Mehrphasenmotoren	77
Theorie der Wechselstrommotoren	72
Von selbst angehende Motoren	75
Wirkung von geringer Frequenz auf die Motoren	28
Zweiphasenmotoren	77
Westinghouse-Wechselstrommaschine	47
Wirbelströme.	
Mittel zur Vermeidung von Wirbelströmen	40
E. Thomson über Wirbelströme	41
Zentralstation: Cassel	66
» Keswick	65
» Lynton	65
» Sardiniastreet	64
Zentralstation mit Gleichstrom	57
Zentralstation mit Wechselstrom	59
Zipernowsky-Motor	75
Zweiphasenmotoren.	77
Zweiphasenmotorenmodell	77

8-98

S. C.

WYDZIAŁY POLITECHNICZNE KRAKÓW

BIBLIOTEKA GŁÓWNA



L. inv.

5411

Biblioteka Politechniki Krakowskiej



100000294816