universität innsbruck
Universitäts- und Landesbibliothek Tirol

Universitäts- und Landesbibliothek Tirol

Elementare Vorlesungen über Elektrizität und Magnetismus

Thompson, Silvanus Phillips

Tübingen, 1897

Kapitel X. Dynamomaschinen und Transformatoren

urn:nbn:at:at-ubi:2-6344

KAPITEL X.

DYNAMOMASCHINEN UND TRANSFORMATOREN.

XLII. VORLESUNG: *Magnetelektrische und dynamoelektrische Maschinen.*

456. Einfache magnetelektrische Maschinen. Faraday's Entdeckung, dass in einem Drahte, welcher in einem magnetischen Felde bewegt wird, ein Strom induziert wird, führte zur Konstruktion von **magnetelektrischen Maschinen**, um mit denselben statt mit Volta'schen Batterieen Ströme zu erzeugen. Faraday selbst konstruierte im Jahre 1831 die ersten derartigen Maschinen (Fig. 236). Bei den ersten Versuchen von Pixii (1833), Saxton und Clarke, wurden Spulen von isoliertem Drahte auf einer Achse befestigt und vor den Polen starker Stahlmagnete in schnelle Rotation versetzt. Da jedoch die auf diese Weise erzeugten Ströme abwechselnd entgegengesetzte Richtung hatten, wurde ein *Kommutator* (welcher mit den Spiralen rotierte), an der Achse befestigt, damit die successiven Ströme sämtlich dieselbe Richtung erhielten. Fig. 236 veranschaulicht die von Sturgeon im Jahre 1836 befolgte Methode, bei der mittelst einer gespaltenen Kupferröhre die Verbindung mit dem äussern Stromleiter bei jeder halben Umdrehung gewechselt wurde.

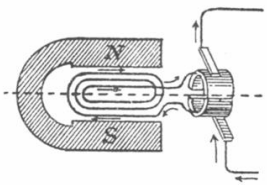

Fig. 236.

In der Figur rotiert die Drahtspule um eine Längsachse, wobei der obere Teil sich zum Beobachter bewegt. Die Pfeile geben die Richtung der induzierten Ströme an, welche von dem Kommutator an die Kontaktbürsten abgegeben werden. Die kleinen magnetelektrischen Maschinen, welche noch heute bei Mechanikern käuflich sind, beruhen auf diesem Prinzipe. Holmes und van Malderen konstruierten kräftigere Maschinen, wobei es dem letztern gelang, näherungsweise einen kontinuierlichen Strom zu erhalten, indem er 64 einzelne Rollen an einer gemeinschaftlichen Achse befestigte und dieselben zwischen den Polen von 4 kräftigen Magneten rotieren liess.

Im Jahre 1856 erfand Siemens eine verbesserte Armatur, bei welcher die Drahtrollen *der Länge nach* um eine Spindel von besonderer Form gewunden wurden, wobei er den Vorteil hatte, dass er eine grössere Anzahl von Kraftlinien durchschneiden konnte, wenn die Rollen in einem kräftigen »Felde« zwischen den Polen einer Reihe von neben einander befindlichen Stahlmagneten rotieren. Die nächste von Wilde herrührende Verbesserung war die Verwendung von Elektromagneten an Stelle der Stahlmagnete, welche das »Feld« erzeugten, in welchem die Armatur rotierte; diese Elektromagnete wurden durch Ströme erregt, welche eine kleine magnetelektrische Hilfsmaschine lieferte, die ebenfalls in Rotation erhalten wurde. Werden die Ströme nicht kommutiert, sondern die Enden der rotierenden Spule mit ein Paar Kontaktringen verbunden, gegen welche 2 Bürsten drücken, so giebt die Maschine *Wechselströme*. Fig. 237 veranschaulicht eine primitive Form einer *Wechselstrommaschine*. Ist die induzierte E.M.K. in den Drähten, wenn sie sich am *N*-Pole vorbei zum Beobachter bewegen, von links nach rechts gerichtet, so werden die beiden Kontaktringe bei jeder halben Umdrehung abwechselnd positiv und negativ.

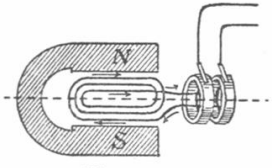

Fig. 237.

457. Dynamo-elektrische Maschinen. Den Namen

Dynamoelektrische Maschine oder kurz *Dynamo* führt jede Maschine, welche mechanische Kraft in elektrische Kraft umwandelt durch Erzeugung relativer Bewegung zwischen Magneten und Konduktoren. Der als Magnet wirkende Teil heisst *Feldmagnet.* Bei den Gleichstrom-Generatoren ist er gewöhnlich feststehend; bei einigen Wechselstrommaschinen lässt man ihn rotieren. Seine Aufgabe ist, eine grosse Anzahl magnetischer Linien zu schaffen. Der als aktiver Konduktor wirkende Teil, welcher die magnetischen Linien durchschneidet und in welchem die E.M.K. induziert wird, heisst die *Armatur.* Bei Gleichstrom-Generatoren rotiert die Armatur zwischen den Polen des Feldmagnets; bei einigen Wechselstrommaschinen steht dieselbe fest. Bei den ältesten Maschinen wurde der Magnetismus der Feldmagnete extra erregt. Hjorth, Murray, S. A. Varley und Andere machten verschiedentlich den Vorschlag, die in der Armatur erzeugten Ströme zur Erregung der Feldmagnete zu benutzen. Dies geschah im Jahre 1867 von Varley, Siemens und Wheatstone. Der schwache Strom, welcher durch den schwachen, zurückgebliebenen Magnetismus induziert wird, wird um den Elektromagnet geschickt, um seinen Magnetismus zu verstärken und denselben dadurch in den Stand zu setzen, noch stärkere Ströme zu induzieren. Diese selbsterregenden Maschinen nannte Siemens **Dynamo-elektrische** Maschinen oder Generatoren, zur Unterscheidung von denjenigen Generatoren, bei denen permanente Stahlmagnete zur Anwendung kamen. In beiden Fällen ist der Strom eine Folge magnetelektrischer Induktion, und in beiden Fällen stammt die Energie der auf diese Weise induzierten Ströme von der dynamischen Kraft der Dampfmaschine oder des Motors, welcher die Drahtspulen in dem magnetischen Felde rotieren lässt. Doch ist der Name auf alle Generatoren übertragen worden, ob selbsterregend oder nicht. In jedem Falle ist die erzeugte E.M.K. der Anzahl der Drahtwindungen in der rotierenden Armatur, und der Umdrehungsgeschwindigkeit proportional. Sind Ströme von geringer E.M.K., aber von bedeutender Stärke erforderlich, wie bei der galvanischen Ver-

silberung, so dürfen die rotierenden Armaturen des Generators keinen grossen innern Widerstand haben und müssen daher aus wenigen Windungen eines starken Drahtes oder aus bandförmigen Kupferstreifen bestehen. Um Ströme von hoher E.M.K. zu erzeugen, muss die Armatur aus *zahlreichen* Drahtwindungen oder aus in geeigneter Weise verbundenen Kupferstäben bestehen und muss in einem sehr kräftigen magnetischen Felde rotieren.

458. Dynamomaschinen mit kontinuierlichen Strömen. Die verschiedenen Dynamomaschinen unterscheiden sich von einander durch die Aufstellung ihrer Feldmagnete und durch die Art und Weise, wie für eine Kontinuität der induzierten Ströme gesorgt wird. Die meisten Dynamomaschinen mit kontinuierlichen Strömen haben einen einfachen Feldmagnet mit 2 Polen; doch giebt es auch solche mit 4, 6 oder 8 Polen. Die modernen Armaturen sind sehr kompliziert. Eine einfache Spule, wie in Fig. 236, mit einem zweiteiligen Kommutator liefert keinen beständigen Strom, denn die E.M.K. nimmt bei jeder Umdrehung zweimal bis auf Null ab. Die Spulen müssen so angeordnet werden, dass stets einige von ihnen thätig sind. Bei den meisten Dynamomaschinen wird die Armatur als *geschlossene Spule* konstruiert, indem der Draht auf einen *ringförmigen* Eisenkern gewickelt wird (wie bei Pacinotti und Gramme), oder als *Trommel* über einen *cylindrischen* Kern (wie bei Siemens oder von Hefner), oder mit flachen *scheibenförmigen* Spulen (Desrozier). Stets sind die Wickelungen derart verbunden (vergl. Fig. 184), dass die Spule ohne Ende ist. Wird der Strom auf der einen Seite einer solchen Spule eingeführt und auf der andern Seite abgeleitet, so giebt es zwei Bahnen durch die Spule hindurch. Da dieselbe zwischen den Polen des Magnets rotiert, so haben die elektromotorischen Kräfte, welche in den aufsteigenden und niedersteigenden Teilen induziert werden, das Bestreben, die Ströme parallel durch diese Teile zu schicken; folglich muss man an geeigneten Stellen Kontaktbürsten anbringen, um diese Ströme aus den rotierenden Spulen abzuleiten. Die Bürsten hat man jedoch nicht mit den Spulen selbst, sondern mit einem

Kommutator (Fig. 238) in Verbindung zu bringen, der aus einer Reihe von Kupferstäben besteht, die von einander isoliert und mit der Armatur in regelmässigen Abständen verbunden sind. Betrachten wir z. B. einen Gramme'schen Ring, der gewissermaßen aus einer Reihe von Spulen zusammengesetzt ist, die auf einen ringförmigen Eisendraht gewickelt sind. Jede Spule repräsentiert einen Abschnitt der Wickelung, und alle stehen mit einander in Verbindung, das Ende des einen Abschnitts mit dem Anfang der nächsten, und jede dieser Verbindungen ist mit einem Stabe des Kommutators verbunden. Der Strom kann nicht von einem Stabe des Kommutators auf den nächsten übergehen, ohne den dazwischen befindlichen Abschnitt der Wickelung zu durchfliessen. Der Kommutator rotiert mit der Armatur, während die *Bürsten*, welche in passende Halter eingefügt sind, gegen seine Oberfläche drücken und so eingestellt sind, dass der Strom möglichst ohne Funkensprühen in sie eintritt. Um Funkensprühen zu vermeiden, hat man die Bürsten etwas vor dem symmetrisch zwischen den Polen liegenden Durchmesser anzubringen; denn der Strom wird in jedem Abschnitt der Wickelung beim Durchgange unter der Bürste umgekehrt und muss sich deshalb in diesem Augenblicke in einem magnetischen Felde von hinreichender Stärke bewegen. Der Strom in der Armatur übt eine magnetisierende Wirkung aus und ist bestrebt, das magnetische Feld in der Richtung der Rotation zu verschieben. Um dies möglichst zu verhindern, verwendet man einen sehr kräftigen, massiven Feldmagnet. Die Bürsten, welche den Strom aufnehmen, waren ursprünglich elastische Drahtbündel; bei den modernen Maschinen sind sie aus Kupferstreifen oder Kupfergaze zusammengesetzt oder bestehen aus kleinen Kohleklötzen. Fig. 239 veranschaulicht den Typus einer modernen Dynamo, mit einem vertikalen Magnet aus massivem Schmiede-

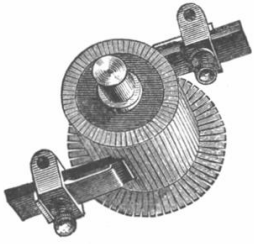

Fig. 238.

eisen, der durch Ströme magnetisiert wird, die in den auf beide Schenkel gewundenen Spiralen fliessen. Unten zwischen den ausgehöhlten Polflächen befindet sich die rotierende Armatur

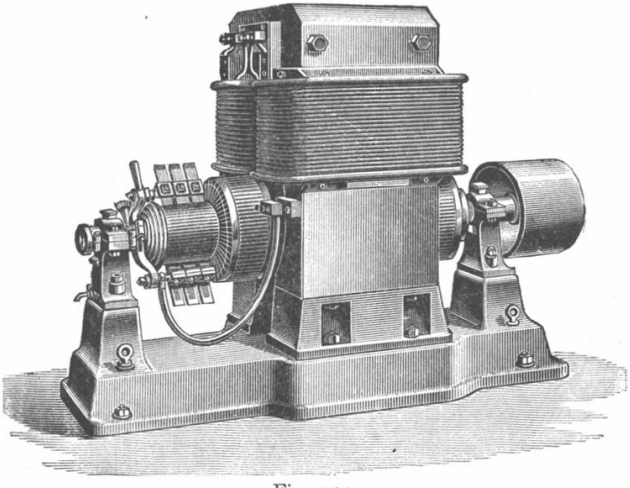

Fig. 239.

(in diesem Falle eine Trommelarmatur) mit dem Kommutator und den Bürsten. Der Kern der Armatur besteht aus dünnen Eisenplatten, welche von einander isoliert sind, um Wirbelströme zu verhüten.

Alle Dynamomaschinen mit kontinuierlichen Strömen laufen als Motoren (Art. 438), wenn dieselben durch einen Strom mit geeigneten Volt gespeist werden [1]).

459. Berechnungen bei Dynamomaschinen. Bei einer Dynamo mit 2 Polen sei N die Gesamtzahl der magnetischen Linien, welche der Feldmagnet durch die Armatur schickt, S sei die Anzahl der Drähte auf der Armatur, und n die Zahl der Umdrehungen pro Sekunde, so beträgt die durch die rotierende Armatur erzeugte elektromotorische Kraft:

---

1) Die genauere Beschreibung der Dynamomaschinen, sowie Ausführliches über sachgemäße Konstruktion lese man in des Verfassers Lehrbuch über Dynamoelektrisches Maschinenwesen nach.

$$E = \frac{n \,.\, S \,.\, N}{10^8},$$

denn das Schneiden der magnetischen Linien in einer Sekunde ist jeder dieser 3 Grössen proportional. Wir dividieren durch 10^8, um auf Volt zu reduzieren Falls ein innerer Widerstand r vorhanden ist, sind ebenso wie bei Batterieen (Art. 166) die nutzbaren Volt um $r.C$ geringer als die in Summa erzeugten Volt, d. h.

$$V = E - r.C.$$

Da der elektrische Nutzeffekt der Maschine gleich dem Verhältniss $V : E$ ist, so folgt, dass r möglichst klein zu machen ist.

Beispiel. Für eine Dynamo sei $N = 7{,}170{,}000$ und $S = 120$; es werden 780 Umdrehungen in der Minute gemacht (d. h. 13 pro Sekunde), dann beträgt die erzeugte E.M.K. $= 111$ Volt. Ist $r = 0{,}033$ Ohm und $C = 210$ Ampère, so ist $r \,.\, C = 7$ Volt. Folglich $V = 104$ Volt.

Der Strom C, welchen eine Dynamo liefert, hängt von dem Widerstande etc. der Stromleitung ab. Das Maximum, welches sie an Strom abgeben kann, wird durch verschiedene Umstände bedingt, wie von der Erwärmung ihrer Teile, vom Funkensprühen an den Bürsten, welches sehr in Frage kommt, wenn die Maschine zu viel Strom abgiebt, von der mechanischen Stärke ihrer Teile, sowie von der Kraft der treibenden Dampfmaschine.

Die *Brutto-Kraft* einer Dynamo ist gleich dem Produkte der Ampère und der gesamten erzeugten E.M.K., also gleich $C \,.\, E$. Die *Netto-Kraft* ist gleich dem Produkte der Ampère und der Volt an den Polen, d. h. gleich $C \,.\, V$. Diese Zahlen werden durch Division mit 746 auf Pferdekräfte reduziert. Der *Nutzeffekt* einer Dynamo ist das Verhältnis der Netto-Kraft zur mechanischen Kraft, welche zum Betreiben der Maschine verwandt wird.

Alle Konduktoren an der Armatur einer Dynamo sind, wenn die Maschine läuft, einem mechanischen Zuge unterworfen, welcher der Umdrehung entgegengesetzt ist. Dies ist eine Folge der Wirkung des magnetischen Feldes auf den Strom (Art. 335).

Etwas Kraft wird auch von den Wirbelströmen (Art. 452)

und von der Verzögerung in dem Kerne der Armatur (Art. 363) verbraucht, sowie von den Wirbelströmen (Art. 458) in den rotierenden Metallmassen. Bei gut konstruierten Maschinen sind diese Verluste jedoch nur gering.

460. Erregung der Feldmagnete. Es giebt verschiedene Methoden, um den Magnetismus der Feldmagnete zu erregen, und dementsprechend haben wir folgende Einteilung:

1) *Magnet-Maschinen*, mit permanenten Stahlmagneten.

2) *Magnetelektrische mit besonderem Erreger;* hier werden die Ströme, welche zur Erregung der Feldmagnete benutzt werden, von einer besondern Maschine, dem *Erreger*, geliefert.

3) *Dynamo mit besonderer Spule*, welche man auf die Armatur wickelt, um den erregenden Strom zu erzeugen.

4) *Serien-Dynamo*, wo die Spulen des Feldmagnets in Serien verbunden sind mit denen der Armatur und dem äussern Stromkreise. Sie bestehen aus wenigen Windungen eines dicken Drahtes (Fig. 240).

5) *Dynamo mit Nebenschluss;* die Spulen des Feldmagnets bilden einen Nebenschluss zu dem Hauptstromkreise. Da sie aus zahlreichen, dünnen Drahtwindungen bestehen, so leiten sie nur einen kleinen Teil des gesamten Stromes ab (Fig. 241).

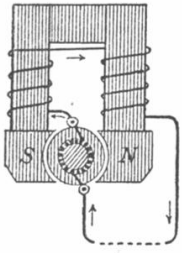

Fig. 240.

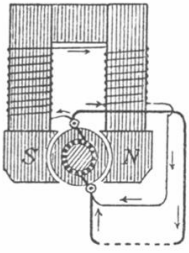

Fig. 241.

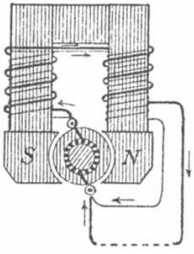

Fig. 242.

6) *Compound-Dynamo*, wo die Erregung teils mittelst eines Nebenschlusses, teils durch Serien-Spulen stattfindet (Fig. 242).

Jede Art der Wickelung hat ihre besonderen Vorteile.

461. Charakteristische Kurven. Um die Wirkungsweise der verschiedenen Arten der Dynamomaschinen zu er-

kennen, erfand Hopkinson die Methode der *charakteristischen Kurven*, bei welcher die beiden Elemente der Kraftleistung, die Volt und die Ampère, graphisch verzeichnet werden. Wird eine Serien-Dynamo mittelst Ampèrometer und Voltmeter geprüft, während sie mit konstanter Geschwindigkeit bei verschiedenen Belastungen läuft, so ergiebt sich eine Kurve ähnlich OQV (Fig. 243), wo die äussern Volt vertikal, die Ampère horizontal verzeichnet sind. Dies ist die äussere charakteristische Kurve. Nimmt der Strom zu, so steigen die Volt infolge der zunehmenden Magnetisierung; ist diese jedoch nahe an der Sättigung, so nehmen die Volt ab infolge des innern Widerstandes und verschiedener Reaktionen. In einem beliebigen Punkte Q wird der Widerstand des äussern Stromkreises durch die Neigung der Linie QO dargestellt, d. h. durch die trigonometrische Tangente des Winkels QOX, denn tan $QOX = QM : OM$ gleich dem Verhältnis der Volt zu den Ampère. Ziehen wir eine Linie $Q\mathcal{J}$ derart, dass tan $\mathcal{J}OX$ gleich dem innern Widerstande ist, so repräsentiert MN die verloren gegangenen Volt, wenn der Strom $= OM$ ist. Fügen wir der Strecke QM noch ein Stück $PQ = MN$ hinzu, so erhalten wir PM, den entsprechenden Wert der gesamten E.M.K. Auf diese Weise können wir aus der Kurve OV die charakteristische Kurve OE ableiten. Wird der gesamte Widerstand (d. h. die Neigung der Linie OP) vermehrt, so bewegt sich P längs der Kurve abwärts nach O, und von einer gewissen Stelle an wird jede weitere Zunahme in der Neigung zur Folge haben, dass die Volt und Ampère schnell abnehmen und fast bis auf Null sinken. Dies ist eine Eigentümlichkeit der Serien-Maschinen; laufen dieselben mit einer gewissen Geschwindigkeit, so versagt ihr Strom, sobald der Widerstand eine gewisse kritische Grösse überschreitet, die von der Konstruktion der einzelnen Maschine abhängt.

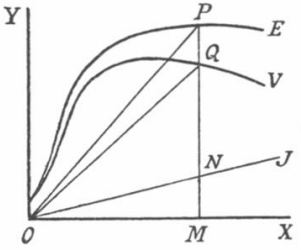

Fig. 243.

Bei einer Maschine mit Nebenschluss hat die charakteristische Kurve eine andere Gestalt. Ist der Stromkreis offen, und kein äusserer Strom vorhanden, so ist der Strom im Nebenschluss voll in Thätigkeit, um den Magnet zu erregen. Die Volt-Kurve *YV* beginnt mit einem hohen Werte, und da der Strom durch Verminderung des Widerstandes verstärkt wird, so nehmen die Volt langsam ab. Diese Abnahme ist teils eine Folge des innern Widerstandes, teils eine Folge von Reaktionen der Armatur, teils rührt sie von der Reduktion des Stromes im Nebenschluss her. Wenn die Neigung der Geraden *OJ* den innern Widerstand darstellt, so können wir die verloren gegangenen Volt *MN* bestimmen und diese oberhalb des Punktes *Q* hinzufügen. Wir erhalten dann einen Punkt *P*, welcher auf der Kurve der totalen E.M.K. liegt. Auch diese Kurve fällt langsam. Wenn eine Maschine mit Nebenschluss einen kurzen Stromkreis hat, so nimmt ihr Magnetismus plötzlich fast bis auf Null ab. Um die Volt einer solchen Maschine zu regulieren, lässt sich ein geeigneter Rheostat (Fig. 200) in den Nebenschluss einschalten, um den erregenden Strom zu verändern.

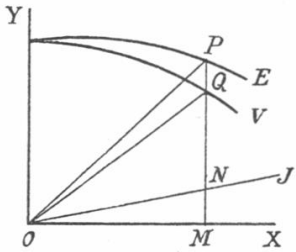

Fig. 244.

462. Maschinen mit konstanten Volts. Zur Speisung von Glühlampen sind Maschinen erforderlich, welche mit konstanter Spannung arbeiten, gleichviel, ob der in die Hauptleitung fliessende Strom stark oder schwach ist. Der von der Maschine abgegebene Strom reguliert sich selbst genau nach Bedarf; indem mehr Strom fliesst, wenn mehr Lampen eingeschaltet werden, vorausgesetzt, dass die Potentialdifferenz der Hauptstränge konstant erhalten wird. Für diesen Zweck genügt weder eine Serien-Dynamo noch eine mit konstanter Geschwindigkeit laufende Maschine mit Nebenschluss; letztere höchstens bei geeigneter Regulierung. Man hat zu beobachten, dass bei Maschinen mit Nebenschluss die charakteristische Kurve fällt, wenn die Strom-

stärke zunimmt, während die Kurve bei einer Serien-Dynamo steigt. Demnach lässt sich die Zahl der Volt merklich konstant erhalten, wenn man eine *Compound-Wicklung* benutzt, bestehend aus einer Nebenschlusswicklung (um einem offenen Stromkreise die geeignete Zahl der Volt zu geben), und aus ein paar Wicklungen dicken Drahtes, in Serien mit dem Hauptstrange verbunden (um die Erregung im Verhältnis der Kraftabgabe zu steigern).

463. Maschinen mit konstanter Stromstärke. Um einen unveränderlichen Strom in einer Serie von Lampen zu erhalten, wie es bei Bogenlichtbeleuchtung oft erforderlich ist, (Art. 443) benutzt man besondere Dynamomaschinen, die unter dem Namen von *Bogenlicht-Maschinen* bekannt sind. Die besten dieser Art sind die von Brush und die von Thomson-Houston. Beide haben Armaturen mit offenen Spulen (wo die Spulen nicht in einem geschlossenen Stromleiter angeordnet sind), mit besondern Kommutatoren und automatischen Vorrichtungen, um die Kraftabgabe zu regulieren, entweder durch Nebenschluss des erregenden Stromes oder durch Verschiebung der Bürsten. Der Strom lässt sich auf diese Weise z. B. auf 10 Ampère erhalten, während die Volt je nach der Zahl der im Stromkreise befindlichen Lampen zwischen 50 bis 2000 schwanken.

464. Unipolar-Maschinen. Es giebt noch eine andere Gruppe von dynamoelektrischen Maschinen, welche sich wesentlich von allen bisher genannten unterscheiden. Bei diesen Maschinen rotiert eine Spule oder ein anderer beweglicher Konduktor um einen Magnetpol und durchschneidet dabei die magnetischen Kraftlinien in kontinuierlicher Weise, ohne dass eine Umkehr in der Richtung der induzierten Ströme stattfindet. Solche Maschinen heissen Unipolar-Maschinen. Dieselben haben jedoch nur eine sehr geringe E.M.K. und sind in der Praxis nicht verwendbar. Faraday's Scheibenmaschine (Fig. 126) gehört dieser Gruppe an.

XLIII. VORLESUNG: *Wechselströme.*

465. Periodische Ströme. Wir haben gesehen, dass die Rotation einer einfachen Spule in einem magnetischen Felde elektromotorische Kräfte ins Leben ruft, deren Richtung sich bei jeder halben Umdrehung ändert, und welche daher *Wechselströme* erzeugen. Bei jeder ganzen Umdrehung tritt eine E.M.K. auf, welche bis zu einem Maximum steigt und dann bis Null abnimmt, worauf ihr unmittelbar eine entgegengesetzt gerichtete E.M.K. folgt, welche ebenfalls ein Maximum erreicht und dann bis Null abnimmt. Jede solche Operationsreihe heisst eine *Periode*, und die Anzahl der in einer Sekunde erfolgten Perioden heisst die *Frequenz* oder *Periodizität* und soll im folgenden mit dem Buchstaben n bezeichnet werden. Bei den Maschinen mit 2 Polen ist n gleichbedeutend mit der Anzahl der Umdrehungen pro Sekunde; bei Maschinen mit mehreren Polen dagegen wächst n proportional mit der Anzahl der Polpaare. Bei einer Umdrehung in einem gleichförmigen Felde sind die hervorgerufenen elektromotorischen Kräfte dem sinus des Winkels proportional, um welchen sich die Spule gedreht hat, von der Lage an gerechnet, wo sie quer zum Felde liegt. Sei N die Anzahl der magnetischen Linien, welche in dieser Lage durch die Spule gehen, und S die Anzahl der Windungen der Spule, so ist der Wert der induzierten E.M.K. zur Zeit t, wo die Spule sich um den Winkel $\Theta (= 2\pi nt)$ gedreht hat,

$$E_\Theta = 2\pi nSN \sin\Theta : 10^8 = D \,.\, \sin\Theta,$$

wenn wir zur Abkürzung $2\pi nSN : 10^8 = D$ setzen.

In Wirklichkeit sind die magnetischen Felder nicht gleichförmig und die Spulen nicht einfache Schleifen, so dass das periodische Wachsen und Abnehmen der elektromotorischen Kräfte nicht notwendig einem einfachen Sinusgesetze folgt. Die Form der Wellen hängt ab von der Gestalt der Polflächen sowie von der Form und Breite der Spulen. In den meisten Fällen sind wir jedoch zu der Annahme berechtigt, dass die erzeugte

E.M.K. angenähert einem Sinusgesetze folgt, so dass sich ihr Wert zu jeder Zeit durch die obige Formel ausdrücken lässt, wo D der Maximalwert oder die von E erreichte *Amplitude* ist, und Θ ein *Phasenwinkel* an einem gedachten Kreise. Betrachten wir einen Punkt P, welcher sich in der Richtung der Bewegung des Uhrzeigers auf einem Kreise bewegt und setzen wir den Radius dieses Kreises $= 1$, so ist PM der sinus des Winkels Θ. Teilen wir dann den Kreis in eine beliebige Anzahl gleicher Winkel und ziehen für jeden derselben die Sinuslinie, so können wir letztere in gleichen Abständen längs einer horizontalen Linie (Fig. 245) als Ordinaten antragen und erhalten auf diese Weise die Sinuslinie.

In Fig. 245 entspricht ein Umlauf des P längs des Kreises einem vollständigen Wechsel oder Cyklus. Der Wert der E.M.K.

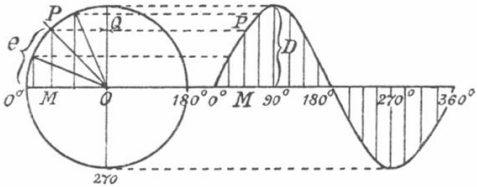

Fig. 245.

(deren Maximalwerte $+D$ und $-D$ sind) lässt sich für jeden Augenblick entweder durch die Sinuslinie PM oder durch ihre Projektion OQ auf den vertikalen Durchmesser darstellen. Wenn der Punkt P rotiert, oscilliert der Punkt Q auf diesem Durchmesser.

Die Ströme, welche von diesen periodischen oder wechselnden elektromotorischen Kräften herrühren, sind ebenfalls periodisch und wechselnd; sie wachsen zu einem Maximum an, nehmen bis Null ab, fliessen dann in entgegengesetzter Richtung, nehmen zu bis zu einem Maximum und gehen durch Null wieder in die andere Richtung über u. s. w.

Wenn die E.M.K. 100 solche Cyklen pro Sekunde durchmacht, so thut es der Strom ebenfalls.

466. Virtuelle Volt und virtuelle Ampère. Die

Messinstrumente für Wechselströme, wie z. B. die Elektrodynamometer (Art. 390), die Voltmeter von Cardew (Art. 425) und die elektrostatischen Voltmeter (Art. 285), messen nicht die arithmetischen Durchschnittswerte der Ampère oder Volt. Falls die Instrumente unter Anwendung von Gleichströmen kalibriert worden sind, so geben sie die Quadratwurzeln der mittleren Quadrate der Werte an. Mit andern Worten: sie messen die sogenannten *virtuellen Ampère* oder *virtuellen Volt.*

Der Mittelwert, welchen sie angeben, beträgt (falls wir annehmen, dass die Ströme und die Zahl der Volt das Sinusgesetz befolgen) das 0,707 fache der Maximalwerte, denn der Durchschnitt der Quadrate des sinus (in Bezug auf einen Quadranten oder einen ganzen Kreis) ist $\frac{1}{2}$; folglich ist der Wert der Quadratwurzel der mittleren Quadrate das $\frac{1}{\sqrt{2}}$ fache ihres Maximalwertes. Wird ein Voltmeter in einen Wechsel-Stromkreis geschaltet, wo die Volt zwischen + 100 und — 100 schwanken, so giebt dasselbe 70,7 Volt an; und es würden bei Anwendung von Gleichströmen 70,7 Volt erforderlich sein, um dieselbe Ablesung zu erhalten. Wenn ein Wechselstrom-Ampèrometer 100 Ampère angiebt, so steigt der Strom in Wirklichkeit auf 141,4 Ampère und sinkt dann bis auf — 141,4; aber die Wirkung ist die von 100 Gleichstrom-Ampère und daher würde ein solcher Strom als ein Strom von 100 virtuellen Ampère zu bezeichnen sein.

467. Verzögerung und Beschleunigung. Wechselströme halten nicht immer gleichen Schritt mit den im Stromkreise vorhandenen Volt. Findet im Stromkreise eine Selbstinduktion statt, so bleiben die Ströme zurück; ist Kapazität im Stromkreise, so sind sie in der Phase voraus. Fig. 246 illustriert die durch Selbstinduktion erzeugte Verzögerung. Die Maxima und Minima der Stromimpulse, welche durch die stärkere Linie dargestellt werden, treten etwas *später* ein als die der Volt. Die Selbstinduktion hat jedoch ausser der Phasenverzögerung noch eine andere Wirkung von grösserer Wichtigkeit; sie erzeugt Reaktionen auf die E.M.K., wodurch der Strom geschwächt wird.

Während der Strom an Stärke zunimmt, strebt die Selbstinduktion sein Anwachsen zu verhindern. Um einen Strom von 40 Ampère in einem Widerstande von $1\frac{1}{2}$ Ohm zu erzeugen, ist bei gleichgerichteten Strömen eine E.M.K. von 60 Volt erforderlich. Bei Wechselströmen würden 60 Volt jedoch nicht genügen, wenn Selbstinduktion in dem Stromkreise vorhanden ist. Die Sache wird noch durch

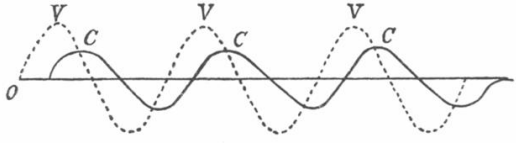

Fig. 246.

den Umstand kompliziert, dass die Impulse der gegenwirkenden elektromotorischen Kraft wieder andere Phase haben; sie sind thatsächlich $\frac{1}{4}$ Periode hinter dem Strome zurück. Fliesst ein Wechselstrom von C (virtuellen) Ampère mit einer Frequenz von n Cyklen pro Sekunde durch einen Stromleiter mit der Selbstinduktion L, so beträgt die gegenwirkende elektromotorische Kraft[1]) $2\pi nLC$ (virtuelle) Volt. Ist z. B. $L = 0{,}002$ Henry, $n = 50$ Perioden pro Sekunde und $C = 40$ Ampère, so beträgt die gegenwirkende E.M.K. 25,1 Volt. Wollen wir nun die 40 (virtuellen) Ampère nicht allein durch den Widerstand von $1\frac{1}{2}$ Ohm treiben, sondern auch dieser reagierenden Kraft entgegen, so sind mehr als 60 Volt erforderlich. Doch haben wir nicht $60 + 25{,}1$ Volt nötig, da Gegenwirkung und Strom verschiedene Phasen haben. Das Ohm'sche Gesetz verliert hier seine Giltigkeit. Um die Anzahl der erforderlichen Volt zu berechnen, nehmen wir unsere Zuflucht zur Geometrie.

---

1) Dies wird in folgender Weise berechnet. Nach Art. 453 ist $E = L \cdot \frac{dC}{dt}$. Nun ist C nach der Annahme eine Sinusfunktion der Zeit — mit dem augenblicklichen Werte $C_0 \sin 2\pi nt$, wo C_0 der Maximalwert von C ist. Differentiieren wir dies in Bezug auf die Zeit, so ergiebt sich $\frac{dC}{dt} = 2\pi n C_0 \cdot \cos 2\pi nt$. Da die »virtuellen« Werte des sin. und cos. gleich sind, haben wir für E den Wert $2\pi nLC$, der sich jedoch um $\frac{1}{4}$ Periode vom Strome unterscheidet.

Wir verzeichnen (Fig. 247) die Wellenkurve *OAbd*, welche den Volt entspricht, die erforderlich sind, um den Strom durch den Widerstand zu treiben, falls keine Selbstinduktion vorhanden

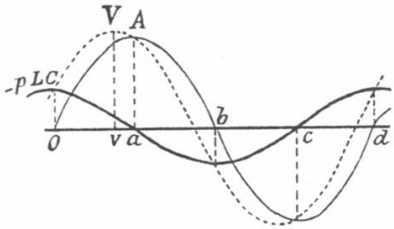

Fig. 247.

ist. Dies können wir als Stromkurve bezeichnen. Dann ziehen wir die mit $-pLC$ bezeichnete Kurve, welche die Volt repräsentiert, die erforderlich sind, um der Reaktion der Selbstinduktion das Gleichgewicht zu halten. Hierbei haben wir p statt $2\pi n$ geschrieben. Die Ordinate in O beträgt 25,1 und die Kurve ist um $\frac{1}{4}$ Periode zurück verschoben; denn wenn der Strom am stärksten wächst, wie in O, ist die Wirkung der Selbstinduktion am grössten. Dann wollen wir diese beiden Kurven kombinieren, indem wir ihre Ordinaten summieren. Wir erhalten so die punktierte Kurve, welche in V ihren Maximalpunkt hat. Dies ist die Kurve der Volt, welche dem Stromkreise zugeführt werden müssen, um den gewünschten Strom zu erzeugen. Wie man sieht, erreicht die Stromkurve ihren Maximalpunkt etwas später als die Kurve der Volt. Der Strom bleibt in der Phase hinter den Volt zurück. Ist *Od* die Zeit einer vollen Periode, so repräsentiert *va* die Zeit, welche zwischen dem Maximum der Volt und dem der Ampère verfliesst. Fig. 248 stellt dieselben Thatsachen in einem Umdrehungs-Diagramm dar, ähnlich wie Fig. 245. Die Linie *OA* repräsentiert die arbeitenden Volt $R \cdot C$, während die Linie $AD \perp OA$ die durch Selbstinduktion erzeugten Volt pLC angiebt. Kombinieren wir dieselben nach dem Parallelogramm der Kräfte, so erhalten wir die Linie *OD* als die dem

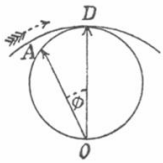

Fig. 248.

Stromkreise zugeführten Volt. Die Projektionen dieser drei Linien auf eine vertikale Linie geben, falls die Figur um das Zentrum O rotiert, die augenblicklichen Werte der drei Grössen. Der Winkel $AOD = \Phi$, um welchen der Strom hinter den Volt zurückbleibt, heisst der *Verzögerungswinkel.* Wie gross auch die Selbstinduktion oder die Frequenz sein möge, der Winkel Φ kann nie grösser als 90^0 sein. Ist $OA = 60$ und $AD = 25{,}1$, so ist $OD = 65$ Volt. Die zugeleiteten Volt müssen der Bedingung genügen: $E^2 = (RC)^2 + (pLC)^2$. Hieraus folgt:

$$C = \frac{E}{\sqrt{R^2 + p^2L^2}}.$$

Der hier auftretende Nenner heisst gewöhnlich *Impedenz.*

468. Gesetz von Maxwell. In den Fig. 249 und 250

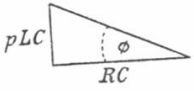

Fig. 249.

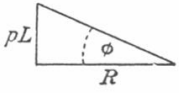

Fig. 250.

ist der Verzögerungswinkel so gezeichnet, dass

$$\tan \Phi = \frac{pLC}{RC} = \frac{pL}{R}$$

ist. Es leuchtet ein, dass die Wirkung der Selbstinduktion zur Folge hat, dass der Stromleiter so wirkt, als ob sein Widerstand von R auf $\sqrt{R^2 + p^2L^2}$ erhöht würde. In der That richtet sich der Wechselstrom nicht nach dem Widerstande des Stromleiters, sondern nach seiner Impedenz. Gleichzeitig bleibt der Strom zurück, als ob der Winkel, auf den bezogen wird, nicht Θ, sondern $\Theta - \Phi$ wäre, so dass die Gleichung für die augenblicklichen Werte von C lautet:

$$C = \frac{D \sin(\Theta - \Phi)}{\sqrt{R^2 + p^2L^2}},$$

wo $E = D \,.\, \sin \Theta$ ist. Dies ist das Gesetz von Maxwell für periodische, durch Selbstinduktion verzögerte Ströme. Da die Instrumente die Phase nicht berücksichtigen, sondern virtuelle Werte geben, so ist die obige einfachere Form gewöhnlich ausreichend.

Die in einen Wechselstromkreis eingeführte Kapazität hat eine Beschleunigung der Phase zur Folge, da die Reaktion eines Kondensators den Strom rückwärts zu treiben strebt, statt ihn zu verlängern. Die Gegenwirkung ist demnach $-1:pK$, und

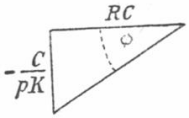

Fig. 251.

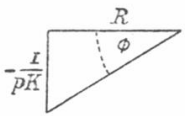

Fig. 252.

der Winkel Φ ist bestimmt durch $\tan\Phi = -1:pKR$. Die Impedenz ist $\sqrt{R^2 + 1:p^2K^2}$.

Wenn sowohl Selbstinduktion als auch Kapazität vorhanden ist, so ist $\tan\Phi = \left(pL - \frac{1}{pK}\right):R$; die Gegenwirkung $= pL - \frac{1}{pK}$ und die Impedenz $= \sqrt{R^2 + \left(pL - \frac{1}{pK}\right)^2}$.

Da Kapazität und Selbstinduktion entgegengesetzte Wirkungen zur Folge haben, so können sie dazu benutzt werden, sich gegenseitig aufzuheben. Sie halten einander das Gleichgewicht, wenn $L = 1:p^2K$. In diesem Falle ist keine Impedenz im Stromkreise vorhanden und die Ströme befolgen das Ohm'sche Gesetz.

469. Hemmspulen. Ist in einem Stromkreise wenig Widerstand und grosse Selbstinduktion vorhanden, so hängt der Strom von letzterer ab. Ist z. B. p (oder $2\pi n$) $= 1000$ und $L =$ 10 Henry, R dagegen nur 1 Ohm, so könnten wir den Widerstand in obiger Formel vernachlässigen und das Gesetz würde einfach heissen:

$$C = E:pL.$$

Selbstinduktionsspulen mit bedeutender Selbstinduktion und geringem Widerstande wendet man häufig an, um Wechselströme zu hemmen. Dieselben heissen *Hemmspulen.*

Würde man den Strom in einen Kondensator von geringer Kapazität führen (etwa $K = 0{,}1$ Mikrofarad und $1:pK = 10{,}000$), so würde der Strom, wenn er in den Kondensator einströmt und ihn wieder verlässt, nur durch die Kapazität und Frequenz

und nicht durch den Widerstand beeinflusst werden und den Wert $C = EpK$ haben.

470. Arbeit des Wechselstromes. Wenn wir die einem Motor oder einem andern Teile eines Wechselstromkreises zugeführte Energie messen wollen, so messen wir einzeln die Ampère und die Volt mit Ampèremeter und Voltmeter und multiplizieren die Ablesungen. Wir erhalten dann als *scheinbare Watt* einen Wert, der häufig die *wahren Watt* bei weitem übertrifft. Dies ist eine Folge der Phasendifferenz, welche die Instrumente nicht berücksichtigen. Die wirkliche Energie ist $W = C . V . \cos \Phi$, wo C und V die virtuellen Werte sind und Φ der Verzögerungswinkel. Der letztere ist jedoch im allgemeinen eine unbekannte Grösse und man muss daher seine Zuflucht zu einem geeigneten Wattmeter nehmen, dessen gewöhnliche Form ein Elektrodynamometer ist (Art. 433), derartig konstruiert, dass der in ihm befindliche Stromkreis mit hohem Widerstande ohne Induktion ist.

Jedesmal wo die Phasendifferenz (gleichviel ob Verzögerung oder Beschleunigung) sehr gross ist, ist der Strom, da er mit den Volt nicht Schritt hält, fast ohne Watt. Dies ist der Fall bei Strömen, die durch eine Hemmspule oder in einen Kondensator fliessen, falls die Widerstände gering sind.

471. Hochfrequenz-Ströme. Die Reaktionen der Selbstinduktion und der Kapazität nehmen zu, wenn die Frequenz zunimmt. Die bei der elektrischen Beleuchtung benutzte Frequenz beträgt 50 bis 120 Cyklen pro Sekunde. Bei Anwendung von Hochfrequenzen von 1000 oder noch mehr Cyklen pro Sekunde ist die Reaktion ungeheuer gross. In diesem Falle fliessen die Ströme nicht gleichmässig durch den Querschnitt des Leitungsdrahtes, sondern sind hauptsächlich auf seine Oberfläche beschränkt, da selbst dicke Kupferstäbe eine grosse Impedenz bieten. Schon bei einer Frequenz von 100 beträgt der Strom in einer Tiefe von 12 mm von der Oberfläche (des Kupfers) nur noch $\frac{1}{7}$ seiner Stärke in den Oberflächenschichten. Bei Eisen beträgt die Tiefe für $\frac{1}{7}$ des Wertes ungefähr 1 mm. Bei derartig schnellen Oscillationen, wie wir sie beim Entladen

einer Leydener Flasche haben, wo die Frequenz mehrere Millionen beträgt, hat die leitende Schicht wahrscheinlich noch nicht die Dicke von 0,01 mm. Hohle Röhren leiten in solchem Falle gerade so gut, wie feste Stäbe von gleichem äusseren Durchmesser. Die Leitungsfähigkeit ist nicht dem Querschnitt, sondern dem Umfange proportional.

Jedesmal wenn ein Strom nicht gleichmässig über den Querschnitt eines Konduktors verteilt ist, tritt eine wirkliche Zunahme seines Widerstandes ein; und die Wärmewirkung ist ein Minimum, wenn der Strom gleichmässig verteilt ist. Der Umstand, dass die oscillatorischen Ströme an der Oberfläche am stärksten sind, ist der beste Beweis für die moderne Anschauungsweise, dass die Energie in einem elektrischen Stromkreise durch das umgebende Medium befördert wird, und nicht durch den Draht (vergl. Art. 514 über Energiepfade).

472. Wechselstrom-Elektromagnete. Wird ein Wechselstrom durch eine Spule geschickt, so erzeugt er ein wechselndes magnetisches Feld. Ein in dieses Feld gebrachter Eisenkern ist einer periodisch wechselnden Magnetisierung unterworfen. Elektromagnete für Wechselströme müssen lamellenartige Eisenkerne haben, um Wirbelströme zu vermeiden; infolge ihrer hemmenden Wirkung sind weniger Drahtwindungen vorhanden als in dem Falle, wo die Elektromagnete für Gleichströme von konstanter Spannung bestimmt sind. Wechselstrom-Elektromagnete stossen Kupferplatten ab infolge der Wirbelströme, welche sie in ihnen erzeugen; wobei die Phase dieser Wirbelströme durch ihre Selbstinduktion verzögert wird. Elihu Thomson, der diese Abstossung untersuchte, konstruierte mehrere auf diesem Prinzipe beruhende Motoren. Wird ein Solenoid mit lamellenförmigem Eisenkern durch Wechselströme bei konstanten Volts gespeist, so zieht dasselbe den Eisenkern mit bedeutend stärkerer Kraft an, wenn derselbe noch vorragt, als wenn er sich in der Höhlung befindet. Dies ist ebenfalls eine Folge der hemmenden Wirkung.

XLIV. VORLESUNG: *Wechselstrom-Generatoren.*

473. Wechselstrommaschinen. Die einfache Wechselstrommaschine (Fig. 237) mit ihren beiden Gleitringen, welche zur Abnahme des Stromes dienen, ist ein blosses Modell. In der Praxis sind Maschinen erforderlich, welche ihren Strom bei einer Spannung von 1000 bis 5000 Volt abgeben, mit einer Frequenz von 50 bis 120 Cyklen pro Stunde. Niedrigere Frequenzen sind für Beleuchtungszwecke nicht geeignet, obschon sie zur Kraftübertragung zu verwenden sind. Hohe Volts sind bei Wechselströmen deshalb gebräuchlich, weil bei Anwendung von Transformatoren an Kupferdraht gespart wird (Art. 442). Unter diesen Bedingungen werden fast alle Wechselstrommaschinen als Multipolarmaschinen konstruiert; und da eine vollkommene Isolation, welche in den Armaturen erforderlich ist, eher erzielt wird, wenn diese Teile sich nicht bewegen, so ist es üblich, dieselben unbeweglich aufzustellen und dafür den Feldmagnet rotieren zu lassen. Letzterer wird besonders erregt durch einen kleinen Gleichstrom, welcher ihm durch Gleitringe zugeführt wird. Ein Vorzug der Wechselstrommaschinen vor den Gleichstrommaschinen ist der Mangel eines Kommutators.

Von den verschiedenen Systemen der Wechselstrommaschinen wollen wir folgende erwähnen: 1) Innerhalb rotierender Magnet, bestehend aus einer Reihe von alternierenden *N*- und *S*-Polen, welche radial nach aussen gerichtet sind; die Armatur ausserhalb, fest, bestehend aus einer Anzahl von Spulen, die entweder auf einen eisernen Ring gewickelt sind, (Gramme), oder auf nach innen vorragende Eisenpole (Ganz), oder an der inneren Seite eines Eisenkerns angebracht sind (Elwell-Parker), oder in Vertiefungen liegen, gerade einem Eisenkern gegenüber (Brown). Wird ein Eisenkern bei der Armatur benutzt, so ist derselbe jedesmal sorgfältig lamelliert. 2) Ausserhalb feststehender Magnet, bestehend aus einer Anzahl alternierender Pole, die radial nach innen zeigen; Armatur innerhalb und rotierend,

bestehend aus einer Anzahl von Spulen, welche entweder um einen cylindrischen Eisenkern gewickelt werden (Westinghouse, Thomson-Houston), oder auf radial vorstehenden Polen befestigt sind (Hopkinson). 3) Ausserhalb feststehender Magnet, bestehend aus zwei Kränzen von alternierenden *N*- und *S*-Polen, welch letztere einander dicht gegenüberstehen und auf diese Weise zwischen sich eine Anzahl magnetischer Felder erzeugen; die Armatur hat keinen Eisenkern, besteht aus einer Anzahl flacher Spulen, die zu einer Art sternförmiger Scheibe gewickelt sind, und rotiert innerhalb der zwischen den Polen befindlichen schmalen Oeffnungen (Siemens, Ferranti).

Eine andere vielfach in England gebräuchliche Form einer Wechselstrommaschine ist die von Mordey (Fig. 253). Die dünnen Spulen der Armatur sind fest und liegen innerhalb eines

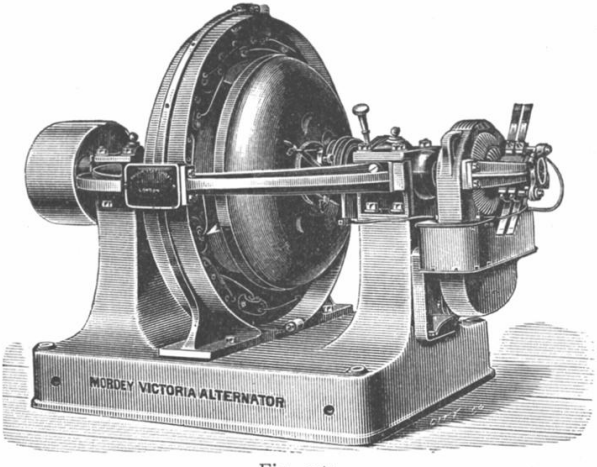

Fig. 253.

unbeweglichen Ringes, zwischen zwei Kränzen von Polen, welche auf beiden Seiten der Spulen rotieren. Die Magnete haben jedoch ihre *N*-Pole auf derselben Seite und ihre *S*-Pole auf der andern Seite; sie sind die Verlängerungen von zwei massiven Eisenpolstücken, welche an der Achse einer grossen innern Spule befestigt sind und auf diese Weise einen einfachen Feld-

magnet ausmachen. Am Ende der Achse befindet sich als Erreger eine kleine Gleichstrommaschine.

474. Verbindung von Wechselstrommaschinen. Beim Gebrauche mehrerer Wechselstrommaschinen für denselben Stromkreis haben wir einen Umstand zu beachten, welcher bei Gleichstrommaschinen nicht in Betracht kommt, da er eine Folge der Phasendifferenz der Ströme ist. Werden 2 Wechselstrommaschinen durch besondere Dampfmaschinen getrieben und laufen sie mit derselben Geschwindigkeit und bei gleicher Anzahl der Volts, so dürfen wir doch ihre Stromkreise nicht direkt mit dem Hauptstrange verbinden, falls sie nicht auch dieselbe Phase haben; denn andernfalls würde eine ernstliche Störung eintreten. Bei Zentralstationen ist es üblich, die einzelnen Maschinen alle neben einander laufen zu lassen. Wenn nun zwei Maschinen denselben Hauptstrang speisen, so ist jede bestrebt, der andern Strom zurück zu schicken; und wenn ihre elektromotorischen Kräfte stets ungleich sind, so sendet die Maschine mit der grössern E.M.K. ihren Strom in entgegengesetzter Richtung durch die andere. Diesen Vorgang erklärt Fig. 254, welche ein rotierendes Diagramm darstellt, ähnlich wie die Fig. 245 und 248. Befinden sich zwei Wechselstrommaschinen genau im gleichen Schritt, so werden beide in demselben Augenblicke nach der Hauptleitung einen Stromimpuls schicken,

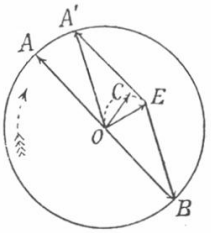

Fig. 254.

doch sind diese Impulse, soweit der sie verbindende Stromkreis in Betracht kommt, genau entgegengesetzt. Diese beiden entgegengesetzten Impulse seien OA und OB. Nehmen wir nun an, dass die eine der beiden Maschinen einen kleinen Vorsprung vor der andern gewinnt, so dass OA in die Lage von OA' kommt, so halten sich die beiden elektromotorischen Kräfte nicht mehr das Gleichgewicht, sondern haben eine Resultierende OE, welche bestrebt ist, einen Strom durch die beiden Maschinen zu schicken, indem dieser Strom eine andere

Phase hat wie die voreilende Maschine *A*, als auch wie die zurückbleibende Maschine *B*. Dieser lokale Strom wird jedoch selbst wieder ein wenig in Phase hinter *OE* zurückbleiben, infolge der Selbstinduktion längs seiner Bahn. Die Phase des Stromes möge dann durch die Linie *OC* dargestellt werden, welche etwas zurückbleibt. Wir haben einen zwischen den beiden Maschinen hin und her gehenden Strom und derselbe ist offenbar der Phase nach näher an *OA* als an *OB*. Hieraus folgt, dass bei der voreilenden Maschine *A* die Volt und Ampère mit einander der Phase nach näher zusammen sind, als bei der zurückbleibenden Maschine *B*. Beachten wir die Art. 431 und 440, so ergiebt sich sofort, dass der Strom die Maschine *B* als Motor treiben hilft, und dass eine grössere mechanische Anstrengung von der Maschine *A* verlangt wird, welche mehr als Generator wirkt. Folglich hat dieser Stromaustausch zur Folge, dass die zurückbleibende Maschine unterstützt und die voreilende Maschine belastet wird; sie werden wieder dieselbe Phase annehmen. Alle gut konstruierten Wechselstrommaschinen laufen, falls sie in geeigneter Weise getrieben werden, parallel zusammen, obgleich ihre elektromotorischen Kräfte ungleich sind. Wenn andererseits zwei Wechselstrommaschinen hinter einander verbunden sind, so hat der resultierende Strom das Bestreben, bei der geringsten Phasendifferenz die zurückbleibende Maschine zu belasten und die voreilende zu beschleunigen, bis ihre Phasen gerade entgegengesetzt sind, so dass die eine ganz als Generator, die andere ganz als Motor läuft. Dies ist von grosser Wichtigkeit bei Kraftübertragung von einer Wechselstrommaschine an dem einen Ende einer Linie nach einer gleichzeitig laufenden Wechselstrommaschine am andern Ende; beide Maschinen halten bei jeder Belastung gleichen Schritt. Doch laufen sie hinter einander nicht zusammen, wenn beide als Generatoren wirken sollen, falls dieselben nicht fest mit derselben Spindel verbunden sind.

Zur Vermeidung von Unfällen, welche bei einer zu plötzlichen Stromübertragung zwischen zwei Maschinen eintreten, be-

dient man sich in Beleuchtungsanlagen gewöhnlich eines Apparates, welcher die Phasen der Wechsel anzeigt. Soll eine Wechselstrommaschine in einen Stromkreis eingeschaltet werden (parallel mit einer oder mehreren andern), so schaltet der Beamte nicht eher ein, als bis die E.M.K. der Maschine genau dieselbe Phase hat wie die des Stromkreises, in welchen sie eingeschaltet werden soll.

XLV. VORLESUNG: *Transformatoren.*

475. **Wechselstrom-Transformatoren.** Bei der Verteilung der Ströme in die Ferne sind Transformatoren erforderlich, denn Glühlampen bedürfen einer geringen Spannung von 50 bis 100 Volt, während die Generatoren, um Kupfer in den Hauptleitungen zu sparen, mit hoher Spannung von 1000 bis 5000 Volt arbeiten müssen. Das Prinzip der Transformation haben wir in Art. 223 kurz erwähnt. Wechselstrom-Transformatoren sind Induktionsspulen mit lamellenartigen Eisenkernen, die gewöhnlich aus dünnen, weichen Eisenstreifen bestehen, welche derartig geformt sind, dass sie einen geschlossenen magnetischen Kreis bilden. Diese Eisenbänder sind von der primären Spule umgeben, welche den Wechselstrom aufnimmt und von einer sekundären Spule, welche den transformierten Wechselstrom abgiebt. Gewöhnlich besteht die primäre Spule aus zahlreichen Windungen dünnen, sehr sorgfältig isolierten Kupferdrahtes, welcher einen schwachen Strom bei hoher Spannung aufnimmt, und die sekundäre Spule aus wenigen Windungen dicken Kupferdrahtes (oder Kupferband), welcher einen bedeutend stärkern Strom bei niedriger Spannung abgiebt.

Um von 2000 Volt bis 100 Volt abwärts zu transformieren, ist das Verhältnis der Windungen wie 20 : 1. Welches auch das Verhältnis der Volt sein möge, die Ströme haben zu einander das umgekehrte Verhältnis, da abgesehen von den unvermeidlichen kleinen Verlusten bei der Transformation die aufgenommene Energie gleich der abgegebenen ist. Ein Trans-

formator habe das Verhältnis 20 : 1 in seinen Windungen, so müssen wir, um 100 Ampère bei 50 Volt aus der sekundären Leitung zu bekommen, in die primäre Leitung wenigstens 5 Ampère bei 1000 Volt hineinschicken.

In zerstreut liegenden Bezirken hat man für jedes Haus einen kleinen Transformator, wobei die Lampen in den Stromkreis mit niedriger Spannung eingeschaltet werden. In grossen Städten stellt man grosse Transformatoren auf Nebenstationen auf, von denen die Leitungen mit niedriger Spannung ausgehen, welche den Strom in die einzelnen Häuser schicken. Fig. 255 veranschaulicht den Gebrauch der Transformatoren bei einem Verteilungssystem.

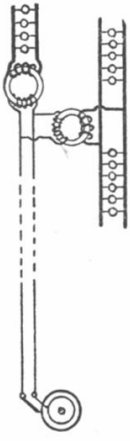

Fig. 255.

476. Elementare Theorie der Transformatoren. Werden die Volt in der primären Leitung konstant erhalten, so sind auch die Volt der sekundären Leitung nahezu konstant, und der Apparat reguliert sich selbst, indem von selbst mehr Strom in die primäre Leitung fliesst, je mehr Lampen in die sekundäre Leitung eingeschaltet werden. Dies ist eine Folge der hemmenden Wirkung der Selbstinduktion in der primären Leitung. Sind keine Lampen in den sekundären Stromkreis eingeschaltet, so wirkt die primäre Spule einfach als Hemmspule. Werden die Lampen eingeschaltet, so wirkt die primäre Spule als Arbeitsspule und induziert Ströme in der sekundären. Ist nur die Hälfte der Lampen eingeschaltet, so wirkt die primäre Spule teils als Hemmspule, teils als Arbeitsspule.

Sei V_1 die Anzahl der Volt an den Polen der primären Leitung, und V_2 diejenige an den Polen der sekundären; ferner sei S_1 die Anzahl der Windungen der primären Spule und S_2 diejenige der sekundären; r_1 sei der innere Widerstand der primären, r_2 derjenige der sekundären. Das Verhältnis der Transformation sei $k = S_1 : S_2$. Die Wechsel des Magnetismus im Eisenkerne erzeugen in den beiden Spulen elektromotorische

Kräfte E_1 und E_2, welche der resp. Anzahl ihrer Windungen genau proportional sind (wenn keine magnetische Streuung stattfindet). Folglich $E_2 = E_1 : k$; und da, abgesehen von kleinen Verlusten der Hysterie, $E_1 C_1 = E_2 C_2$ ist, so folgt, dass $C_1 = C_2 : k$. Die in der primären Leitung verlorenen Volt sind $r_1 C_1$, die in der sekundären $r_2 C_2$. Folglich ist:

$$V_1 = E_1 + r_1 C_1$$
$$V_2 = E_2 - r_2 C_2.$$

Aus der ersten Gleichung ergiebt sich: $E_1 = V_1 - r_1 C_1 = V_1 - r_1 C_2 : k$, und wenn wir $E_1 : k$ für E_2 setzen, so folgt aus der zweiten Gleichung:

$$V_2 = \frac{V_1}{k} - \left(\frac{r_1}{k^2} + r_2\right) C_2.$$

Hieraus ersehen wir, dass der ganze Vorgang in der sekundären Leitung derart ist, als ob die primäre Spule entfernt, V_1 durch einen den Windungen proportionalen Bruchteil ersetzt und gleichzeitig dem innern Widerstande eine Grösse hinzugefügt worden wäre, die gleich dem innern Widerstande der primären Leitung ist, dividiert durch das Quadrat des Verhältnisses der Windungen. Wir sehen auch, dass die Volt der sekundären Leitung dadurch konstant erhalten werden, dass der primäre Generator so reguliert wird, dass die Volt der primären Leitung etwas zunehmen, wenn viel Strom gebraucht wird. Die Ströme der beiden Spulen sind fast genau in entgegengesetzter Phase; sie erreichen zu gleicher Zeit ihre Maximalwerte, und fliessen in entgegengesetzter Richtung um den Eisenkern. Die Wirksamkeit gut konstruierter Transformatoren ist sehr gross, da die innern Verluste einen sehr geringen Prozentsatz der Arbeit ausmachen.

477. Gleichstrom-Transformatoren (Motor-Dynamomaschinen). Um Gleichströme zu transformieren, ist die Anwendung eines rotierenden Apparates erforderlich, der in Wirklichkeit eine Kombination eines Motors und eines Generators ist. Wenn z. B. ein Motor einen Strom von 10 Ampère bei 1000 Volt aufnimmt, so lässt sich mit demselben eine Dynamo betreiben, welche nahezu 200 Ampère bei 50 Volt abgiebt.

Statt zwei besondere Maschinen zu gebrauchen, kann man auch eine einzige Armatur mit 2 Wickelungen und 2 Kommutatoren versehen; die Anzahl der Windungen ist der Anzahl der Volt und ihre Querschnitte sind den Ampère proportional. Solche Motor-Dynamomaschinen finden in der Praxis Anwendung. Die elementare Theorie derselben stimmt mit der des vorigen Artikels überein; E_1 und E_2 bedeuten dann die elektromotorischen Kräfte, welche in den beiden Wickelungen der rotierenden Armatur induziert werden.

478. Gleichstrom-Wechselstrom-Transformatoren. Eine rotierende Vorrichtung, welche aus einer Kombination einer Gleichstrom- und einer Wechselstrommaschine besteht, lässt sich zur Transformation von Gleichströmen in Wechselströme oder umgekehrt benutzen; der eine Teil wirkt als Motor, der andere als Generator. Auch in diesem Falle sind nicht immer zwei besondere Maschinen erforderlich. Fig. 256 stellt eine einfache rotierende Armatur dar, welche sowohl mit einem Spaltröhren-Kommutator versehen ist, der die Gleichströme sammelt, als auch mit ein paar Gleitringen für Wechselströme. Solche Maschine vermag Gleichströme in Wechselströme umzuwandeln, und umgekehrt. Auch kann dieselbe als Motor dienen, wenn sie mit beiden Arten von Strömen gespeist wird, oder kann, mechanisch betrieben, beide Arten Ströme gleichzeitig erzeugen.

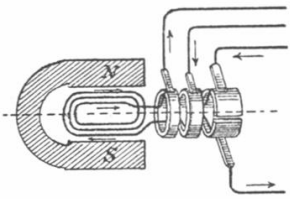

Fig. 256.

XLVI. VORLESUNG: *Wechselstrommotoren.*

479. Wechselstrommotoren. Wir haben in Art. 474 gesehen, dass eine Wechselstrommaschine eine andere als Motor treiben kann, wenn beide Maschinen mit gleicher Phase arbeiten. Solche Motoren haben zwei Mängel: 1) Sie setzen sich nicht von selbst in Bewegung, und müssen, ehe der Strom benutzt

ein rotierendes magnetisches Feld erzeugen, obgleich die Spule selbst still steht. Dies ist der bekannten Methode analog, wo sich aus zwei oscillatorischen Bewegungen eine rotierende, ohne jeden toten Punkt, bilden lässt, indem man zwei rechtwinklig zu einander stehende Kurbelstangen verwendet, um die Impulse in Intervallen von einer viertel Periode auf einander folgen lässt. Die obige Kombination heisst ein *Zwei-Phasen* Stromsystem. Ist der BB'-Strom $\frac{1}{4}$ Periode später als der AA'-Strom, so ist die Rotation in Fig. 258 von links nach rechts gerichtet.

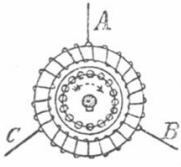

Fig. 258.

Eine andere Methode, ein rotierendes Feld zu erzeugen, ist das *Drei-Phasen* System [1]) (oder der sogenannte Drehstrom). Werden drei Wechselströme, die um $\frac{1}{3}$ Periode (oder 120) von einander differieren, in den Ring an den Stellen A, B und C eingeführt, so fliesst der Strom zuerst bei A ein (und bei B und C aus), darauf bei B (und bei C und A hinaus) und dann bei C (und bei A und B hinaus) und erzeugt, auf diese Weise ein rotierendes magnetisches Feld. Dies ist einer Dampfmaschine mit 3 Kurbelstangen analog, welche um 120° von einander abstehen.

Es giebt verschiedene Methoden, die Stromkreise zu verbinden, welche Ströme von ungleichen Phasen aufnehmen. Man kann z. B. die Wickelungen (Fig. 257) in vier getrennte Spulen zerlegen, von denen jede mit einer gemeinschaftlichen Verbindungsstelle zusammenhängt, während die 4 anderen Enden mit den resp. 4 Liniendrähten verbunden werden. Oder es lassen sich die Wickelungen (Fig. 258) als 3 getrennte Spulen anordnen, und in ähnlicher Weise wie vorher verbinden. Solche Anordnungen heissen *sternförmig*, zum Unterschiede von den *maschenförmigen* Gruppierungen. Auch ist es nicht notwendig, die Spulen über einen Ring zu wickeln. Die Zwei-Phasen-Spulen der Fig. 257 lassen sich auf vier nach innen vorspringende Pol-

1) Drei-Phasen Ströme wurden im Jahre 1891 bei der berühmten Kraftübertragung in Frankfurt benutzt. Vergl. Art. 442.

wird, in schnelle Rotation versetzt werden. 2) Ihre Feldmagnete müssen gesondert erregt werden. Man hat daher versucht, andere Formen von Motoren zu konstruieren. Gewöhnliche Gleichstommotoren, mit lamellenartigen Eisenmagneten, arbeiten mit Wechselströmen, obgleich nicht besonders gut.

Der moderne Wechselstrommotor ist nach den Vorschlägen von Borel (1887), Ferraris (1888) und Tesla (1888) konstruiert und benutzt zwei oder mehrere Wechselströme in verschiedenen Phasen.

480. Ströme mit verschiedenen Phasen. Wenn wir an der Armatur einer Wechselstrommaschine zwei getrennte Spulen anbringen, die eine etwas oberhalb der andern, so können wir offenbar 2 Wechselströme gleicher Frequenz und Stärke erhalten, die sich der Phase nach um jede beliebige Grösse unterscheiden. Gramme konstruierte in der That im Jahre 1878 Wechselstrommaschinen mit zwei und mit drei getrennten Stromkreisen. Werden zwei gleiche Wechselströme, die der Phase nach um eine viertel Periode differieren, in geeigneter Weise vereinigt, so lässt sich mittelst derselben ein *rotierendes magnetisches Feld* erzeugen. In einem solchen Felde lassen sich rotierende Konduktoren anbringen, wie Baily zuerst im Jahre 1879 vorschlug. Betrachten wir einen gewöhnlichen mit einer kontinuierlichen Wickelung versehenen Gramme'schen Ring (Fig. 257). Würde ein einzelner Wechselstrom an den Stellen AA' hineingeschickt, so würde ein oscillatorisches magnetisches Feld entstehen, mit einem N-Pole in A und einem S-Pole in A'. Diese Pole würden darauf verschwinden und in umgekehrter Reihenfolge wieder auftreten. Würde in gleicher Weise ein zweiter Wechselstrom bei BB' hineingeschickt, so würde derselbe ein anderes oscillatorisches Feld längs des Durchmessers BB' erzeugen. Lässt man beide Ströme arbeiten und zwar so, dass der BB'-Strom $\frac{1}{4}$ Periode hinter dem AA'-Strome zurück ist, so werden beide zusammen

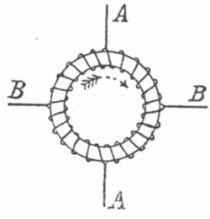

Fig. 257.

stücke wickeln, und ebenso die Drei-Phasen-Spulen der Fig. 258 auf drei nach innen vorragende Polstücke. Bei grössern mehrpoligen Maschinen könnte man eine Reihe von Drei-Phasen-Spulen auf 6, 9, 12 oder mehr Pole in regelmässiger Aufeinanderfolge wickeln.

481. **Eigenschaften des rotierenden Feldes.** In rotierenden magnetischen Feldern beginnen Metallmassen sofort zu rotieren. Ein im Schwerpunkte unterstützter Magnet (oder ein Eisenkern) kann eine gleichzeitige Bewegung anfangen, muss jedoch unter Umständen erst angestossen werden. Ein balancierter Körper aus gut leitendem Metall, wie z. B. Kupfer, wird sich ebenfalls in Bewegung setzen, auch von selbst, jedoch nicht gleichzeitig. Bei einer solchen im Zentrum unterstützten Metallmasse treten Wirbelströme auf (genau wie bei Arago's Rotationen, Art. 452), welche das Metall schleifen und zu drehen streben. Die Stärke dieser Ströme in dem rotierenden Teile hängt von der relativen Geschwindigkeit des Feldes und der Metallmasse ab. Würde sich letztere mit derselben Geschwindigkeit bewegen, wie das rotierende Feld, so würden die Wirbelströme aufhören und es würde keine treibende Kraft vorhanden sein. Das bei solchen Motoren benutzte Metall besteht aus einem cylinderförmigen Kern, der aus dünnen Eisenplatten zusammengesetzt ist, umgeben von einem Gehäuse von Kupferstäben, die mit ihren Enden in einen geschlossenen Stromkreis eingeschaltet sind. Der rotierende Teil hat weder Kommutator noch Gleitringe, und steht mit keinem andern Stromkreise in Verbindung. Er empfängt seine Ströme ausschliesslich durch Induktion. Solche Motoren beginnen die Bewegung mit beträchtlichem Drehungsmoment und besitzen bei voller Thätigkeit eine grosse Wirksamkeit. Aehnliche Motoren, für gewöhnliche oder Einfach-Phasen-Wechselströme sind heutzutage im Gebrauch. Um sie in Betrieb zu setzen, ist es notwendig, den Wechselstrom in zwei der Phase nach sich unterscheidende Ströme zu zerlegen. Dies geschieht mittelst eines geteilten Stromleiters, in dessen beide Zweige verschiedene Gegenwirkungen eingeschaltet werden.

Befindet sich in dem einen Zweige eine Hemmspule mit Selbstinduktion, so wird der Strom in diesem Zweige verzögert; befindet sich in dem andern ein Kondensator, so wird der Strom hier der Phase nach beschleunigt. Durch Kombination dieser beiden Ströme wird ein rotierendes Feld erzeugt, um die Bewegung einzuleiten. Wenn der Motor einmal seine Bewegung begonnen hat, so wird bei weiterer Drehung der Wechselstrom eintreten, und der Motor bewegt sich weiter, obgleich der Impuls jetzt nur oscillatorisch ist.