Elektrische Kraftübertragung

von

Gisbert Kapp

Dritte Auflage

Elektrische Kraftübertragung.

Ein Lehrbuch für Elektrotechniker

von

Gisbert Kapp.

Autorisirte deutsche Ausgabe

von

Dr. L. Holborn und **Dr. K. Kahle.**

Dritte verbesserte und vermehrte Auflage.

Mit zahlreichen in den Text gedruckten Figuren.

Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH

1898

ISBN 978-3-662-35941-9 ISBN 978-3-662-36771-1 (eBook)
DOI 10.1007/978-3-662-36771-1
Softcover reprint of the hardcover 3rd edition 1898

Vorwort.

Abgesehen von kleinen Verbesserungen und Zusätzen unterscheidet sich die vorliegende Auflage von der vorhergehenden nur im letzten Kapitel. Hier haben wir die Beschreibung der Dynamomaschinen fortgelassen und verweisen in dieser Beziehung auf die „Dynamomaschinen für Gleich- und Wechselstrom und Transformatoren“. An die Stelle davon sind Skizzen von Kraftübertragungsanlagen getreten, die dem Anfänger eine Uebersicht über eine Anzahl von ausgeführten Systemen bieten sollen.

November 1897.

L. Holborn. K. Kahle.

Inhalt.

Einleitung.

Die Hauptaufgabe der Maschinentechnik bildet die Uebertragung und Umwandlung von Energie. Denn bisher ist noch kein Mechanismus erfunden worden, mit dessen Hülfe man Energie erzeugen könnte, sondern alle Maschinen haben allein den Zweck, Energie, die bereits in der Natur vorhanden ist, zu übertragen, umzuwandeln und Nutzarbeit verrichten zu lassen. So stellt ein Kohlenlager, das sich mehrere Hundert Meter unter der Erdoberfläche befindet, einen ungeheuren Energievorrath dar; wollen wir diesen aber zu Nutzarbeit verwenden, so ist erst viel Menschen- und Maschinenarbeit erforderlich, um die Kohle an die Erdoberfläche zu fördern und sie an die Stelle zu bringen, wo sich die in der Kohle aufgespeicherte chemische Energie mit Hülfe der Dampfmaschine in mechanische Energie umwandeln lässt, die alsdann weiter übertragen und vertheilt werden kann. Ebenso bildet ein Wasserfall in irgend einer abgelegenen Gebirgsgegend eine grosse Energiequelle. Wollte man sie aber an Ort und Stelle mittelst einer Turbine ausnutzen, so wäre dies in den meisten Fällen sehr unzweckmässig. Denn oft ist entweder der Baugrund für eine Fabrik nicht geeignet oder die weite Entfernung von andern industriellen Anlagen verursacht grosse Kosten in Folge des Transportes der Rohmaterialien und der Fabrikate nach und von der Fabrik. Unter solchen Bedingungen lohnt sich die Arbeit in der Nähe des Wasserfalls wirthschaftlich nicht. Wir müssen vielmehr die Fabrik an einem dem Verkehr näher gelegenen und bequemer erreichbaren Ort erbauen und das Wasser in einer Druckleitung dahin führen.

Die beiden angeführten Beispiele können als typisch für verschiedene Arten der Kraftübertragung gelten. Im ersten Falle wird die Energie nämlich nicht als solche übertragen, sondern nur der Stoff, aus dem sie sich durch einen chemischen Process gewinnen lässt. Denn in einem Stück Kohle ist die Energie gleichsam aufgespeichert, und die Ueberführung der Kohle von einem Orte zum andern kann deshalb als eine Uebertragung von aufgespeicherter Energie aufgefasst werden. Ebenso transportiren wir aufgespeicherte Energie, wenn wir ein Fuder Getreide vom Felde in die Scheune bringen. Denn da dies den Pferden oder andern animalischen Maschinen als Futter dient, so wird es in Nutzarbeit umgesetzt. Das Kennzeichen dieser Art von Kraftübertragung besteht darin, dass erst noch ein chemischer Process vor sich gehen muss, bevor die aufgespeicherte Energie verwendbar wird. Bei der Druckleitung, die das Wasser an eine entfernte Stelle überführt, ist dies nicht der Fall. Die Energie ist hier jederzeit mit Hülfe rein mechanischer Mittel, z. B. einer Turbine oder eines Wasserrades, verwendbar. Sie muss ferner stets in demselben Betrage ausgenutzt werden, in dem sie übertragen wird. Wir können das Wasser in der Rohrleitung nicht ansammeln, während die Kohle beliebig lange Zeit aufbewahrt und nur je nach Bedarf unter dem Dampfkessel verbrannt werden kann.

Die elektrische Kraftübertragung lässt sich in beiden Formen ausführen; eine Aufspeicherung der Energie findet hier allerdings selten statt und ist auch weniger wichtig.

Benutzen wir eine Dampf- und eine Dynamomaschine dazu, um Akkumulatoren zu laden, so sammeln wir einen gewissen Energievorrath. Bringen wir dann die Batterie auf einem Wagen an einen entfernten Ort, so können wir dort mechanische Arbeit leisten, wenn wir mit der Batterie einen Elektromotor treiben. Diese Methode hat schon bei den Strassenbahnen Anwendung gefunden. Hier errichtet man an einem passenden Orte der Linie eine Station, wo die Batterien mit Hülfe von Dampf- und Dynamomaschinen geladen werden und somit Energie in ihnen aufgespeichert wird. Mittelst geeigneter Einrichtungen wird das Umwechseln der erschöpften und geladenen Batterien beschleunigt, so dass der Wagen keinen langen Aufenthalt erfährt und nach kurzer Pause seine Fahrt mit der frisch geladenen Batterie von Neuem fortsetzen kann. Es kommen hierbei beide Systeme der elektrischen Kraftübertragung zur Anwendung: zuerst wird die Energie über eine kleine Entfernung von der Dynamomaschine auf die Akkumulatoren übertragen und dort aufgespeichert; später wird sie im Wagen mitgeführt und ist dann längs der ganzen Bahn verwendbar. Aehnlicher Einrichtungen bedient man sich auch für die Fortbewegung kleiner Boote. Man errichtet zu diesem Zweck an den Ufern grösserer Flüsse Stationen, wo man die Batterien der Fahrzeuge ladet. Ausserdem ist es für grosse Schiffe, die meistens mit elektrischer Beleuchtung versehen sind, sehr bequem, ein elektrisches Boot zu besitzen. Denn dieselbe Dynamomaschine, die Abends die Beleuchtung speist, lässt sich auch am Tage dazu benutzen, die Akkumulatoren des elektrischen Bootes zu laden, so dass es stets zu einer Fahrt von mehreren Stunden bereit liegt. Unterbleibt diese aber, so kann man mit den Akkumulatoren auch wieder die Lampen des grossen Schiffes speisen.

Wir sehen also, dass die elektrische Energie in manchen Fällen erst vorher aufgespeichert wird, ehe man sie auf grössere Entfernungen überträgt. Es fragt sich jedoch, ob sich diese Methode allgemein anwenden lässt, d. h. ob sie in vielen Fällen nicht zu kostspielig ist. Die Antwort wird meist von dem speciellen Fall abhängen; wir wollen uns deshalb darauf beschränken, im Allgemeinen die Bedingungen zu untersuchen, unter denen eine Kraftübertragung mittelst Akkumulatoren ausgeführt werden kann. Zuerst ist es klar, dass man vortheilhafter die Kohle als die Akkumulatoren transportirt, wenn Kohle die ursprüngliche Energiequelle bildet und wenn sich an demjenigen Platze, wo die Energie verbraucht wird, eine Dampfmaschine aufstellen lässt. Anders liegt die Sache schon, falls wir eine Wasserkraft ausnutzen wollen. Wir könnten alsdann bei dem Wasserfall eine Station errichten, wo die Batterien geladen werden, und diese dann auf einer elektrischen Bahn nach der Fabrik schaffen, wo die Energie verbraucht wird. Hier speiste man einen Elektromotor mittelst der Akkumulatoren, die in Folge dessen entladen und darauf auf der Bahn zurücktransportirt würden. Auf diese Weise ginge ein Theil der Energie bei der Uebertragung verloren; er würde für die Zugkraft beim Transport der Batterien verwendet. Der Rest leistete Nutzarbeit im Elektromotor der Fabrik, und das Verhältnis dieses Restes zu der ganzen Energiemenge, die man erhielte, wenn die Akkumulatoren unmittelbar an dem Wasserfall entladen würden, bildete den Wirkungsgrad der Uebertragung. Besitzt die Batterie z. B. eine Kapacität von 1000 Pferdekraftstunden und erfordert die Fortschaffung des Zuges hin und zurück jedes Mal 50 Pferdekraftstunden, so bleiben nur 900 übrig, über die man an den Klemmen des Elektromotors verfügen kann: der Wirkungsgrad der Anlage betrüge also 90 %. Je weiter wir die Batterien mit einem bestimmten Energieverlust (in diesem Falle 10 %) bringen können oder je kleiner der Verlust bei einer gegebenen Entfernung ist, um so vollkommener ist offenbar das Uebertragungssystem. Es hängt dies einmal von der Beschaffenheit der Akkumulatoren ab, sodann von der Art des Weges und der Bahnanlage. Denn je mehr Energie in einer Batterie vom gegebenen Gewicht aufgespeichert werden kann und je geringere Steigung und Reibung bei der Fahrt zu überwinden ist, um so geringer wird die Arbeit, die wir für den Transport aufzuwenden haben, im Verhältnis zu der gesammten verfügbaren Arbeit sein.

Es ist interessant, ein solches Uebertragungssystem mit den hinreichend bekannten Fällen zu vergleichen, wo aufgespeicherte Energie in Form von Getreide oder Kohle transportirt wird. Das Getreide. wird auf dem Felde, wo es wächst, auf Wagen geladen und von Pferden nach der Scheune gezogen. Das Feld bildet also hier den Anfangspunkt der Kraftübertragung. Die Pferde dienen als Bewegungsmaschinen, deren Unterhalt von einem Theil des geernteten Getreides bestritten wird. Das Verhältnis dieses Theils zu der ganzen Ernte bildet den Wirkungsgrad der Uebertragung, der von der Beschaffenheit des Weges, dem Nährwerth des Getreides, der Zugkraft der Pferde u. s. w. abhängt. Beträgt der Wirkungsgrad wieder, wie vorher, 90 %, so stehen uns von je 100 Scheffeln Getreide, die eingebracht werden, noch 90 Scheffel in der Scheune zur freien Verfügung, und das Uebertragungssystem ist um so besser, je weiter wir das Getreide mit einem Verlust von 10 % fahren können.

Die Uebertragung von aufgespeicherter Energie in Form von Kohle ist ähnlich. Auf der Grube laden wir die Kohle auf Wagen und bringen sie z. B. auf der Eisenbahn zu der Stelle, wo die Energie gebraucht wird. Auf diesem Wege geht ein Theil der Energie, der für die Zugkraft benutzt wird, verloren.

In der folgenden Tabelle (Cantor Lectures des Verfassers, 1891) sind die Entfernungen angegeben, auf die man Energie mit einem Wirkungsgrad von 90 % nach den verschiedenen Systemen übertragen kann. Die Geschwindigkeit der Uebertragung ist gleich 6, 14 und 32 km in der Stunde gesetzt, wenn sie mittelst Kohle und Akkumulatoren auf der Landstrasse, der Strassenbahn und der Eisenbahn stattfindet; die Geschwindigkeit der Beförderung mittelst Pferde ist dagegen für alle drei Wegarten zu 6 km in der Stunde angenommen.

Energiequelle	Entfernung in km, erreichbar bei einem Wirkungsgrad von 90 % auf der		
	Landstrasse	Strassenbahn	Eisenbahn
Kohle und Dampfmaschine .	184	432	2080
Getreide und Pferd	83	272	704
Akkumulator und Elektromotor	6	16	42

Ein Blick auf diese Tabelle lehrt, wie sehr die elektrische Uebertragung aufgespeicherter Energie den andern Systemen gegenüber im Nachtheil ist. Dieser geringe Wirkungsgrad, sowie die grossen Anschaffungskosten der Batterien und ihre geringe Haltbarkeit beschränken die Anwendung dieser Methode auf solche Fälle, wo andere Uebertragungssysteme aus besondern Gründen nicht anwendbar sind.

Wir kommen nun auf die aussichtsvollere Methode der elektrischen Kraftübertragung zurück, bei der die Energie in Gestalt eines elektrischen Stromes unmittelbar in einem Drahte fortgeleitet wird. Bei diesem System sind im Wesentlichen drei Theile zu unterscheiden. Zuerst haben wir eine Station, wo eine Dampfmaschine oder Turbine für eine Dynamomaschine die mechanische Energie liefert, die alsdann in elektrische umgesetzt und als elektrischer Strom von bestimmter Stärke und Spannung in die Leitung aus Kupferdrähten abgegeben wird. Auf diesem Wege gelangt die Energie nach der zweiten Station, wo der elektrische Strom mittelst eines Elektromotors wieder in mechanische Energie verwandelt wird. Generator, Leitung und Motor bilden also die drei Theile der Uebertragungsanlage. Die besondern Einrichtungen, mit denen die Energie von dem primären Motor auf den Generator übertragen und von dem Motor abgenommen wird, gehören eigentlich nicht zu der elektrischen Kraftübertragung, obgleich sie keineswegs fehlen können.

Wir kommen nun auf unser früheres Beispiel zurück, wo es sich um die Ausnutzung eines Wasserfalls handelte, der sich in einer abgelegenen Gebirgsgegend befinden soll. Eine Fabrik konnte an Ort und Stelle nicht errichtet werden, wir mussten vielmehr das Wasser in einer Druckleitung nach dem nächsten Platze führen, wo sich eine Turbine aufstellen liess. Die Entfernung dieses Platzes ist durch die Kosten der Wasserleitung und den Druckverlust in Folge der Reibung beschränkt. Richten wir statt dessen aber eine elektrische Leitung ein, die aus einfachen Kupferdrähten mit den nöthigen Stangen und Isolatoren besteht, so wird die Uebertragung billiger. Wir können also die Leitung auch länger machen, wenn die örtlichen Bedingungen es erfordern, dass die Fabrik weiter von der Energiequelle abliegt, und auf diese Weise noch Quellen natürlicher Energie ausnutzen, die mit andern Uebertragungssystemen nicht mehr zu erreichen sind.

Als solche Quellen kommen besonders Kohle, Wind und Wasser in Frage. Uebertragen wir die Energie der Kohle auf elektrischem Wege, so geschieht dies bis jetzt mehr aus dem Grunde, die Energie bequemer vertheilen zu können; eine Ausnutzung natürlicher Energie, die sonst verloren ginge, liegt nicht vor. Wir betreiben zwar Bahnen mit elektrischer Energie, die ursprünglich durch Verbrennung von Kohle gewonnen ist; aber dies geschieht nicht so sehr deshalb, weil wir dabei an Energie sparen, sondern weil die elektrischen Bahnen nicht durch Lärm, Hitze, Staub und Rauch lästig werden und deshalb in den Städten den Vorzug verdienen. In ähnlicher Weise ersetzen wir die langen Wellen und Riemen oder die sonstigen Uebertragungen, die bisher in den Werkstätten gebräuchlich waren, durch kleine Elektromotoren, von denen jeder seine eigene Werkzeugmaschine treibt, weil es bequemer ist und die Energie erspart wird, die bei den mechanischen Uebertragungen verloren ging. Wir brennen folglich weniger Kohle und können die Energie passender vertheilen.

Auch in den Kohlengruben wenden wir die elektrische Kraftübertragung an, jedoch nicht so sehr deshalb, weil sie einen grössern Wirkungsgrad hat als Druckluft oder Druckwasser, sondern weil sie bequemer ist und ein geringeres Anlagekapital erfordert. Ob jemals die Energie, die man aus der Verbrennung der Kohle gewinnt, über weite Entfernungen hin auf elektrischem Wege übertragen werden wird, wie es heute mit der Wasserkraft geschieht, lässt sich schwer vorhersagen. Man hat freilich vorgeschlagen, grosse Dynamomaschinen an den Kohlengruben aufzustellen und mit Hülfe von Dampfkraft elektrischen Strom aus dem Kohlenstaub zu gewinnen, der den Transport auf der Eisenbahn nicht lohnt. Der Strom sollte dann nach benachbarten Industrieplätzen geleitet, und somit selbst der Abfall der Kohlenlager nutzbar gemacht werden. Bis jetzt hatte dieser Vorschlag noch keinen grössern Anklang gewonnen. Seitdem jedoch die Kraftübertragung durch Wechselstrom in den letzten Jahren immer mehr Eingang gefunden hat, fängt man auch an, die in der Nähe der Kohlengruben erzeugten Dampfkräfte auf weite Entfernungen elektrisch zu übertragen, wie die im Bau begriffenen Anlagen in Johannesburg (45 km) und in Oberschlesien (25 km) beweisen.

Bei der heutigen Entwicklung der elektrischen Kraftübertragung handelt es sich hauptsächlich darum, die Energie von Wasserkräften nutzbar zu machen, die bisher gar keine Verwendung finden. Es lassen sich hierbei ungeheuer grosse Energiemengen gewinnen. So stellt z. B. der Rheinfall bei Schaffhausen eine Energie von 1750000 P dar. Der Niagarafall wird auf 7000000 P geschätzt. Die Wasserkräfte von ganz Frankreich werden von dem Ingenieur Chretien auf 17000000 P angegeben. Diese Summe ist sehr gross im Verhältnis zu der Energie, die in den Fabriken eines Landes im Ganzen verbraucht wird, wie sich leicht aus folgenden Betrachtungen ergiebt.

Der gesammte Kohlenverbrauch Grossbritanniens beträgt jährlich 150000000 t. Davon entfallen 44 % für Hüttenzwecke und sonstige metallurgische Processe, 26 % für den Verbrauch der Haushaltungen, die mit Gas, Wasser und Heizung versehen werden müssen, 5 % für die Bahnen und 25 % für Fabriken. Nehmen wir an, dass $^4/_5$ des letzten Postens, also 30000000 t für Dampfmaschinen verbraucht würden, dass ferner für eine Pferdekraftstunde im Durchschnitt 2,5 kg Kohle erforderlich sind und dass die Maschinen während 3000 Stunden des Jahres arbeiten, so ist die durchschnittliche Leistung sämmtlicher Dampfmaschinen Grossbritanniens gleich 3500000 P zu setzen. Nehmen wir den Verbrauch in Amerika und in den übrigen Ländern als doppelt so gross an, so erhalten wir als Leistung sämmtlicher Dampfmaschinen der Erde 10000000 P. Es ist dies weniger, als die Wasserkräfte Frankreichs allein liefern.

Könnten wir die Wasserkräfte auf der ganzen Erde ausnutzen, so brauchten wir, im Ganzen genommen, gar keine Kohle. Für die einzelnen Länder würde dies natürlich nicht überall durchzuführen sein. Aber selbst jene Gegenden, die reichlich mit Wasserkräften versehen sind, könnten keinen Gebrauch davon machen, wenn wir nicht im Stande wären, die natürliche Energie auf weite Entfernungen hin zu übertragen. Dies hat man begreiflicher Weise zuerst in solchen Ländern versucht, wo Wasserkräfte reichlich vorhanden sind, die Feuerung dagegen theuer ist. So bringt z. B. die Schweiz keine Kohle hervor, und der Vorrath an Holz deckt kaum den Bedarf der Haushaltungen. Die Besitzer von Dampfmaschinen sind in Folge dessen ganz auf die Einfuhr von Kohle angewiesen, die dem Lande jährlich 16000000 M. kostet. Sobald sich daher die Industrie in der Schweiz entwickelte, war man darauf bedacht, die Energie der Wasserfälle auszunutzen und sie dahin zu übertragen, wo man sie am vortheilhaftesten verwenden konnte.

Das erste Kraftübertragungssystem im grössern Stil wurde im Jahre 1850 von Ferdinand Hirn im Elsass angelegt; ihm gelang es, Energie mittelst flacher Stahlseile auf 80 und später auf 240 m zu übertragen. Die Anlage fand einen solchen Anklang, dass es zehn Jahre später in Süddeutschland und der Schweiz etwa 400 ähnlicher gab, die insgesammt eine Energie von 4200 P übertrugen. An die Stelle der flachen Stahlseile waren jedoch runde getreten, die über Rollen mit V-förmigen Rillen liefen. Im Jahre 1863 errichtete Moser eine Anlage von bedeutender Grösse, mit der er die Wasserkräfte des Rheinfalls auszunutzen gedachte. Mit Hülfe eines Wehres, dass sich quer in den Fluss erstreckte, schuf er einen Wasserfall von 4 bis 5 m Höhe. Drei Turbinen von je 750 P wurden auf dem linken Ufer angelegt, und die Energie quer über den Fluss auf das rechte Ufer übertragen; hier empfingen sie verschiedene Mühlen und Fabriken von Schaffhausen, welche die Pferdekraft jährlich mit 100 bis 120 M. bezahlten. Diese Kraftübertragung ist durch eine elektrische Anlage ersetzt, die von den Oerlikoner Werken gebaut worden ist.

Diese Umwandlung der bewährten Schaffhausener Seilübertragung beweist hinreichend die Ueberlegenheit des elektrischen Systems. Bei der mechanischen Uebertragung ist die Entfernung und die Menge der zu übertragenden Energie beschränkt; ferner verursachen die Seilthürme und die rasche Abnutzung der Seile grosse Kosten, und eine Aenderung der Temperatur beeinflusst die Spannung der Seile sehr stark. Es ist daher zweifelhaft, ob solche mechanischen Systeme auf die Dauer der elektrischen Kraftübertragung gegenüber das Feld behaupten können. Es werden bereits in der Schweiz allein viele Tausend Pferdestärken aus Wasserkräften gewonnen und auf elektrischem Wege vertheilt und übertragen. Wir erwähnen hier nur beispielsweise das Werk in Wynau a. d. Aar, wo die Pferdestärke innerhalb eines Gebiets von 40 km mit 150 Frcs. im Jahr verkauft wird, und die im Bau begriffenen Anlagen bei Rheinfelden, die schon theilweise auf deutschem Gebiet liegen. Es sollen hier 15000 P aus den Stromschnellen des Rheins gewonnen werden und in einem Umkreise von 20 km auf elektrischem Wege für Kraft- und Beleuchtungszwecke vertheilt werden.

In Deutschland werden hauptsächlich eine Anzahl von elektrischen Beleuchtungscentralen durch Wasserkräfte gespeist, wie z. B. die Isarwerke bei München und die Beleuchtung von Heilbronn durch die elektrische Kraftübertragung in Lauffen.

In Frankreich ist besonders die Wasserkraft der Rhone und ihrer Nebenflüsse für elektrische Kraftübertragung benutzt worden. Neben der noch bestehenden Seilübertragung (250 P) in Bellegarde (Dep. Ain) ist eine elektrische Anlage von 7000 P entstanden. Ferner sind grosse Werke (12000 P) in Lyon im Bau begriffen.

Auch in den Vereinigten Staaten giebt es viele Wasserkräfte, die durch elektrische Uebertragung nutzbar gemacht werden können. Im Jahre 1880 betrug die gesammte Energie, die von den Dampf- und Wasserkräften des Landes geliefert wurde, 3400000 P, von denen 1225000 P auf die Wasserkräfte entfielen. Bedenkt man, dass die elektrische Kraftübertragung damals fast noch gar nicht entwickelt war, so muss der grösste Theil der Wasserkräfte an Ort und Stelle ausgenutzt worden sein; es giebt deshalb jedenfalls noch weit mehr solcher Energiequelleu, die erst mit Hülfe von elektrischer Uebertragung verwendbar gemacht werden können. Diese hat namentlich in den letzten Jahren stark zugenommen, und die Zahl der Anlagen, die Wasserkräfte in Licht und Kraft umsetzen, beträgt heute in den Vereinigten Staaten mindestens 300. Besonders treten hiervon die Werke am Niagara hervor, wo man 50000 P aus dem Wasserfall gewinnt, die nach ihrer Umsetzung in elektrische Energie zum grossen Theil in unmittelbarer Nähe des Wasserfalls in elektrochemischen Fabriken verbraucht werden. Jedoch werden 5000 P mittelst Drehstroms von 11000 V Spannung auf eine Entfernung von 46 km nach der Stadt Buffalo übertragen, wo sie hauptsächlich zum Antrieb der Strassenbahn verwandt werden.

In Grossbritannien spielt die elektrische Uebertragung von Wasserkräften keine grosse Rolle. Denn einmal ist dort die Kohle billig, sodann aber giebt es dort keine Wasserfälle von einiger Grösse, die nicht schon in Benutzung genommen wären. Man findet jedoch auch hier einige Beispiele von elektrischen Kraftübertragungen, von denen die elektrische Centrale in Worcester und die elektrochemischen Werke an den Falls of Foyers (Schottland) erwähnt sein mögen.

Aus der folgenden Tabelle, die der Elektrotechn. Ztschft. (1896,

S. 711) entnommen ist und die eine Zusammenstellung der damals fertigen elektrischen Kraftübertragungen auf weite Entfernungen enthält, lässt sich sehr gut erkennen, welche Verbreitung derartige Anlagen schon gewonnen haben.

	Entfernung in km	Spannung der Leitung in Volt	Uebertragene Energie in P
Gleichstrom.			
Ouray, Colo.	6,4	800	1200
Genf, Schweiz	32	6600	400
San Francisco	19,2	8000	1000
Brescia	19,2	15000	700
Val de Travers, Schweiz	35	10400	250
Chaux-de-Fonds-Loccle, Schweiz	48	14400	3600
Einphasiger Wechselstrom.			
Pomona und San Bernardino	21,6 bis 46	1000	800
Telluride, Colo.	4,8	3000	400
Bodie, Colo.	20	3400	160
Rom	29	6000	2000
Davos, Schweiz	3,2	3660	600
La Goule-St. Imier, Schweiz	34,1	5000	2000
Schöngeising, Deutschland	7,2	2600	820
Zweiphasiger Wechselstrom.			
Springfield, Mass.	10,4	3600	820
Quebec, Canada	12,8	5000	2130
Anderson, S. C.	12,8	5500	200
Fitchbourg, Mass.	3,6	2150	400
Dreiphasiger Wechselstrom.			
Winooski, Vt.	4	2500	150
Baltic, Ct.	8	2500	700
St. Hyacinthe, Ca.	8	2500	600
Concord, N. H.	6,4	2500	5000
Fresno, Cal.	56,3	11000	1400
Big Cottonwood nach Salt Lake City, Utah	22,4	10000	1400
Lowell, Mass.	9,6 bis 24	5500	480
Sacramento-Folsom, Cal.	38,4	10000	4000
Redlands, Cal.	12	2500	700
Lauffen-Frankfurt a. M.	175	30000	300
Lauffen-Heilbronn	14,4	5000	600
Oerlikon, Zürich, Schweiz	25	13000	450
Portland, Oregon	19,2	6000	5000
Silverton Mine, Colo.	6,4	2500	400
Eichdorf-Grünberg, Schlesien	25	10000	650

Die elektrische Kraftübertragung dient überhaupt in vielen Fällen nicht dazu, bisher unbenutzte Energiequellen nutzbar zu machen, sondern sie soll nur die Vertheilung und Ausnutzung der Energie erleichtern, die in einer Centralstation erzeugt wird. Zu diesem Zweck verbrennt man meistens Kohle und gewinnt damit Energie, die im Allgemeinen theurer ist als Wasserkraft. Man überträgt alsdann die Energie auf elektrischem Wege nach vielen Arbeitsplätzen, wo man sonst überall kleine Dampfmaschinen aufstellen müsste, und macht dabei eine Ersparnis. Denn einmal hat die grosse Dampfmaschine einen bessern Wirkungsgrad, sodann braucht man weniger Leute zur Bedienung der einen Maschine. Ferner spart man an Platz, da der Elektromotor einen weit geringern Raum beansprucht als eine vollständige Maschinenanlage mit Kesselhaus, Kohlenlager u. s. w. Hierzu kommt, dass der Motor für sehr verschiedene Belastungen denselben Wirkungsgrad besitzt und dass man ihn jederzeit sofort anhalten und wieder in Gang setzen kann, sodass er nie leer zu laufen braucht. Bei einer Dampfmaschine und noch mehr bei dem Gasmotor erfordert das Anlassen dagegen viel Mühe und Geschicklichkeit, so dass man es möglichst zu vermeiden sucht und die Maschine lieber öfter leer laufen lässt. Zum Schluss ist es nicht zu unterschätzen, dass der Elektromotor keine Hitze, kein Geräusch und keine Unreinlichkeit verursacht und keine Explosionsgefahr bietet.

Ausser bei grossen Bahnstationen, Hafenanlagen und Bergwerken wendet man die Elektromotoren besonders in Werkstätten an. Man treibt hier nicht allein Krähne, Aufzüge u. s. w. elektrisch, sondern versieht auch in den besser eingerichteten Fabriken die Werkzeugmaschinen mit Elektromotoren, die den Strom von einer Centrale empfangen. Man erreicht damit alle Vortheile, die eine einzige grosse Maschinenanlage gegenüber vielen kleinen besitzt, sodann fallen die langen Wellen und fast alle Riemenübertragungen fort, die viel Energie verzehren und die theuer zu unterhalten sind.

Der elektrische Betrieb von Werkstätten kann auf zweierlei Arten eingerichtet werden. Wir können entweder jede einzelne Werkzeugmaschine mit einem besondern Motor versehen oder jedesmal einen solchen für eine Gruppe von zwei oder drei Maschinen bestimmen, die dann alle von einer kurzen Welle getrieben werden. Das erste System wendet man bei grossen Werkzeugmaschinen an, die eine bedeutende Antriebskraft erfordern, das andere bei kleinen

Maschinen, von denen die einer Gruppe angehörigen immer alle zusammen im Betriebe sind. Unter dieser Bedingung gewinnt man mit der zweiten Anordnung einen höhern Wirkungsgrad für den einzelnen Motor und verringert zugleich das Anlagekapital. Anderseits sind aber wieder viele Wellen und Riemen zu beaufsichtigen, und der Wirkungsgrad der gesammten Anlage sinkt, wenn nur einige Maschinen im Betriebe sind. Neuerdings ist man deshalb bestrebt, für jede Werkzeugmaschine, wenn sie nicht allzu klein ist, auch einen besondern Motor aufzustellen.

Der Wirkungsgrad dieser elektrischen Uebertragung ist im Verhältnis zu der mechanischen, die lange Wellen mit festen und beweglichen Riemenscheiben, Riemen und Lager erfordert, sehr hoch. Denn die Motoren bedürfen nur des elektrischen Stromes, wenn die Werkzeugmaschinen im Betriebe sind, und die zugeführte elektrische Energie ist in Folge dessen der geleisteten Arbeit nahezu proportional. Bei der mechanischen Uebertragung müssen dagegen stets alle Wellen und sonstigen Uebertragungen in Bewegung gehalten werden, mögen nun alle Werkzeugmaschinen oder nur einige derselben in Thätigkeit sein; die Energie, die in Folge von Reibung verloren geht, bleibt also fast immer konstant, und der Wirkungsgrad der gesammten Anlage ist bei geringer Belastung in diesem Falle viel kleiner als bei der elektrischen Uebertragung.

Ausserdem lässt sich die elektrische Anlage viel mehr den Umständen anpassen und leichter installiren. In dem die Elektricität führenden Leiter wirkt keine mechanische Kraft, wie es bei rein mechanischen Uebertragungen mittelst Riemen, Wellen und Drahtseile oder in Röhren, welche zur Fortleitung von Dampf, Wasser und Luft dienen, der Fall ist. Der Elektricitätsleiter erfährt keine Verunreinigung, keine Erwärmung und keine Bewegung. Man kann ihn biegen und in mancherlei Art bewegen, während er viele Pferdekräfte fortleitet. Er kann um scharfe Ecken geführt werden, und da er an Gewicht nicht schwer ist, lässt er sich mit grösserer Leichtigkeit befestigen als eine mechanische Verbindung. Auf diese Weise ist es möglich, die Energie in Zimmer und Plätze zu führen, die für eine mechanische Uebertragung schlecht gelegen sind. Es entsteht kein Geräusch, kein schlechter Geruch und kein Schmutz bei der Uebertragung, und in Folge dessen ist auch keine grosse Wartung erforderlich. Die Kraft ist dabei ferner unter vollständiger Kontrolle und jeder Verwendung leicht anzupassen. Der gleiche

Stromkreis, aus dem man manche Pferdekraft entnehmen kann, wird gleichzeitig und ebenso passend dazu verwendet, um den Strom für die Bewegung einer Nähmaschine oder eines andern kleinen Hausgeräths zu liefern.

Endlich wird die elektrische Kraftübertragung vielfach zum Transport von Personen und Gütern angewandt. Wir haben bereits oben einige elektrische Bahnen erwähnt, bei denen ein Wasserfall die ursprüngliche Energiequelle bildet, die alsdann auf elektrischem Wege übertragen wird; aber auch in den Fällen, wo die Energie durch Verbrennung von Kohle gewonnen wird, hat ihre elektrische Uebertragung oft mancherlei Vortheile. Für Strassenbahnen, die nur dem Güterverkehr dienen, kann man freilich auch Seilübertragung oder kleine Lokomotiven anwenden, doch sind beide Methoden dem elektrischen Betriebe unterlegen. Wer die elektrische Bahn in den belebten und krummen Strassen der Stadt Boston beobachtet hat, wird zugeben, dass keine andere Betriebsart einen so ungeheuern Verkehr ebenso leicht bewältigt wie die elektrische, ganz abgesehen davon, dass die Anlage einer Seilbahn mitten in der Stadt grosse Kosten und viele technische Schwierigkeiten verursachen würde und dass bei einer Dampfbahn Schmutz und Lärm nicht zu vermeiden wären. Die elektrischen Bahnen können dagegen ohne Gefahr starke Krümmungen besitzen, und die Geschwindigkeit ihrer Wagen lässt sich stets den Umständen anpassen; dabei beanspruchen sie einen geringern Raum als die Wagen der Pferde- oder Dampfbahn, was in belebten Strassen nicht zu unterschätzen ist. Den einzigen Nachtheil der elektrischen Bahnen bildet die oberirdische Stromzufuhr, die für den städtischen Verkehr manche Unzuträglichkeiten im Gefolge hat und die bisher von vielen Stadtbehörden für Linien im eigentlichen Stadtgebiet nicht zugelassen wird. In solchen Fällen leitet man deshalb den Strom mittelst eines unterirdischen Leiters zu, der unter der Fahrbahn in einem Kanal gebettet liegt, oder man nimmt den Strom aus Akkumulatoren, die im Wagen mitgeführt werden.

Erstes Kapitel.

Allgemeine Principien. — Kraftlinien. — Beziehung zwischen mechanischer und elektrischer Energie. — Absolutes Maasssystem. — Idealer Motor und ideale Kraftübertragung. — Technische Einheiten.

Das Princip von der Erhaltung der Kraft, welches die ganze Natur beherrscht, bildet nothwendigerweise auch die Grundlage für alle wissenschaftlichen Untersuchungen der mechanischen und elektrischen Probleme, sowie der meisten Verbesserungen, welche wir an den vorhandenen Maschinen und Apparaten anbringen wollen. In vielen Fällen ist die Thatsache leicht zu begreifen, dass die Energie ihrer Quantität nach konstant bleibt, wenn auch die Form, in welcher sie auftritt, manche Aenderungen erfährt. Wenn z. B. eine Lokomotive einen Eisenbahnzug zieht, so macht uns die Erklärung keine Mühe, wie die Energie des Dampfes im Kessel in die der fortwährend wirkenden Triebkraft verwandelt wird, welche den Widerstand des Zuges bei einer Geschwindigkeit von vielen Kilometern in der Stunde überwindet und gleichzeitig den sogenannten Verlust bestreitet, der durch Deformation, Reibung, Abnutzung und Erhitzung derjenigen Körper entsteht, durch welche die Energie geleitet wird. Die Mittel, mit denen in diesem Falle die Energie verwandelt wird, sind grösstentheils rein mechanische und unserer Phantasie hinreichend bekannt, so dass wir uns ein geistiges Bild von den stattfindenden Processen machen können. Selbst die Verwandlung der Wärme in die Energie des Dampfdrucks ist uns durch die lange Bekanntschaft mit Dampfmaschinen in der einen oder andern Form verständlich geworden.

Mit der elektrischen und chemischen Energie verhält es sich anders. Wir können uns keine Vorstellung von dem Process machen, welcher in einem galvanischen Element stattfindet, wo die chemische Energie in elektrische verwandelt wird. Wir können uns ferner kein

Bild davon machen, wie dieser Strom, nachdem er Hunderte von Meilen in einem Draht zurückgelegt hat, mechanische Energie dem Anker eines Elektromagnets mittheilt und hierdurch telegraphische Signale hervorbringt. Es giebt keine mechanische Verbindung zwischen dem Zeichen gebenden Taster und dem Hebel des Morse'schen Apparats, durch welche Energie in der Form eines Anstosses übertragen werden könnte, wie es in unserem Beispiel bei der Verbindung zwischen Lokomotive und Zug der Fall ist; und doch wird ohne Zweifel Energie übertragen. Wenn wir von dem Verlust absehen, d. h. von der Energie, welche in eine Form verwandelt wird, in der wir sie nicht unmittelbar für den beabsichtigten Zweck nutzbar machen können, so ist der Betrag der elektrischen Energie, der auf der entfernten Station verwendbar ist, dem Werthe der aufgewandten chemischen Energie proportional; und wenn wir den Verlust auch in Rechnung ziehen, so ist die Energiemenge, welche er repräsentirt, zusammen mit derjenigen, welche in Form des elektrischen Stromes an der entfernten Station erhalten wird, wiederum dem Werthe der in der galvanischen Zelle entwickelten chemischen Energie proportional. Ist uns die Natur des chemischen Processes bekannt, der in der Zelle vor sich geht, so können wir mittelst der elektrochemischen Aequivalente stets ausrechnen, welcher Gesammtbetrag an elektrischer Energie aus einem bestimmten Gewicht der Metalle erhalten werden kann.

In ähnlicher Weise besteht ein bestimmtes und konstantes Verhältnis zwischen elektrischer und mechanischer Energie. Es wird nur etwas komplicirt, weil bei den elektrischen Erscheinungen immer gleichzeitig Wärme auftritt. Aber wenn wir für die als Wärme verloren gegangene Energie den entsprechenden Betrag in Abzug bringen, so finden wir, dass einer bestimmten Ausgabe an elektrischer Energie stets derselbe Betrag von mechanischer Energie entspricht, welche Art der Verwandlung wir auch wählen. Obgleich wir die Uebergangsstadien zwischen dem elektrischen Strom und der mechanischen Kraft nicht kennen, so zeigt uns doch das Experiment, dass gewisse bestimmte Beziehungen zwischen ihnen vorhanden sind, und an der Hand dieser experimentellen Thatsachen können wir uns im Geiste ein Bild davon machen, welches das Verständnis dieser Beziehungen erleichtert.

Ein solches geistiges Bild ist die Theorie der *magnetischen Kraftlinien,* welche zuerst von Faraday aufgestellt worden ist.

Wenn wir seiner Methode folgen, um die elektro-mechanischen Erscheinungen unserer Auffassung näher zu bringen, so machen wir keine Annahme über die Realität der Kraftlinien. Ob diese wirklich existiren, ist vollständig gleichgültig. Es genügt, dass alle Experimente, welche wir anstellen können, mit dieser Auffassung verträglich sind und dass die Theorie uns in den Stand setzt, nicht allein experimentelle Thatsachen zu erklären, sondern sie auch wirklich zu messen und zu berechnen.

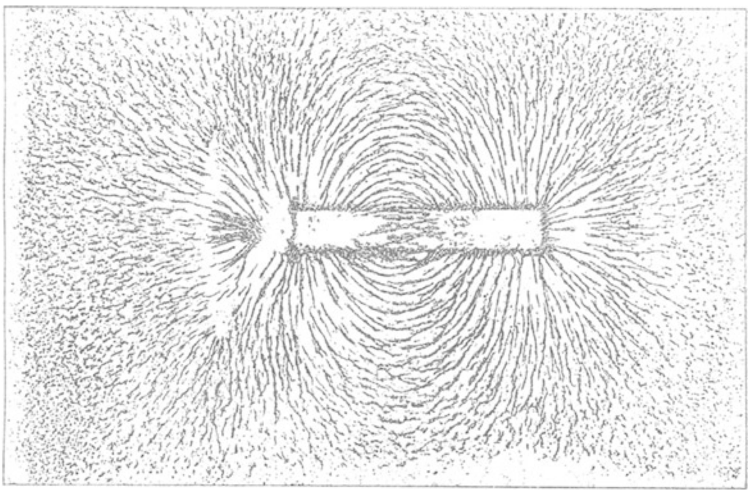


Fig. 1.

Legen[1]) wir ein Blatt Papier über einen geraden Stahlmagnet, der an seinen Enden entgegengesetzte Pole hat, und bestreuen es mit Eisenfeilspähnen, so ordnen sich diese in Kurven an, welche wir als die magnetischen Kraftlinien ansehen (Fig. 1). Jede dieser

[1]) Sehr zweckmässig kann man diese Kurven auf einer Glasplatte fixiren, deren Oberfläche mit einer dünnen Schicht von Paraffin bedeckt ist. Die Glasplatte wird über den Magnet gelegt, mit Eisenfeilspähnen bestreut und sorgfältig abgehoben, so dass die Kurven nicht zerstört werden. Darauf wird sie leicht erwärmt, bis das Paraffin schmilzt. Nachdem sie wieder kalt geworden ist, sind die Eisenfeilspähne in der Paraffindecke fixirt. Die Glasplatte kann dann wie jede andere Zeichnung behandelt werden, und das Bild der Kurven lässt sich durch Photographie vervielfältigen.

Linien bildet eine geschlossene Bahn, die von einem Punkte des einen Magnetendes ausgeht und zu dem entsprechenden Punkte des andern Endes zurückkehrt. Ein Theil der Kurven erstreckt sich weit in den Raum hinein, noch über den Rand des Papiers hinaus, und so weit die offenen Linien sichtbar sind, werden sie desto schwächer, je weiter sie sich von den Polen entfernen. Sie müssen indessen doch als geschlossene Linien betrachtet werden, nur sind sie so schwach, dass wir sie nicht längs ihrer ganzen Länge zeichnen können. Wenn die Pole unseres Magnets zwei mathematische Punkte wären, so würden alle Linien durch diese Punkte hindurchgehen, aber da wir es mit einem physikalischen Magnet zu thun haben, dessen Polflächen von gewisser Grösse sind, so gehen die Kurven von allen Punkten dieser Flächen aus.

Um die magnetischen Eigenschaften dieser Linien zu untersuchen, nehmen wir eine magnetisirte lange, dünne Nadel (z. B. eine Stricknadel), welche vertikal an einem langen Faden aufgehängt ist, so dass das untere Ende der Nadel nicht weit von dem Papier entfernt ist und sich frei darüber bewegt. Wir finden alsdann, dass dieses Ende von dem einen Pol des Magnets abgestossen, von dem andern angezogen wird. In Folge der vereinigten Wirkung beider Kräfte bewegt es sich längs jener Kraftlinie, auf der es im ersten Augenblick dem Papier genähert wurde; niemals wird seine Bahn senkrecht zu den Kraftlinien verlaufen. Wir schliessen aus diesem Versuch, dass die Kraftlinien Wege sind, längs denen sich ein freier Magnetpol unter dem Einfluss des Magnets bewegt. Ein freier Magnetpol vom entgegengesetzten Zeichen wird sich ebenfalls längs der Kraftlinien, aber in entgegengesetzter Richtung, bewegen und hat er dieselbe Stärke, so wird er mit gleicher Kraft fortgetrieben. Wenn wir statt einer langen vertikalen Nadel eine sehr kurze nehmen, die in ihrem Mittelpunkt horizontal dicht über der Papierfläche aufgehängt ist, so suchen die entgegengesetzten Kräfte die Nadel so zu bewegen, dass sie tangential zu der Kraftlinie steht, die durch ihren Mittelpunkt geht, und da alsdann die beiden Kräfte gleich, aber entgegengesetzt sind, so verschiebt sich die Nadel nicht weiter. In welchen Punkt auf einer der Kurven wir die Nadel auch immer bringen, sie wird stets eine solche Lage annehmen, dass ihre magnetische Achse, d. h. die gerade Verbindungslinie ihrer beiden Pole, eine Tangente der Kurve wird (Fig. 2). Man muss hierbei jedoch beachten, dass sich die Nadel aufrecht stellt, wenn sie im Vergleich zu dem Magnet nicht sehr kurz ist, weil in diesem Falle ein merkbarer Unterschied in den Entfernungen ihrer beiden Pole von dem Pol des ruhenden Magnets vorhanden ist und weil in Folge dessen die entgegengesetzt gerichteten Kräfte nicht mehr im Gleichgewicht sind. Ist die Nadel aber sehr kurz, nicht länger wie ein Theilchen von den Eisenfeilspähnen, so ist auch bei einer kleinen Entfernung von dem Pole des Magnets die Ungleichheit zwischen der anziehenden und abstossenden Kraft zu vernachlässigen, und das Theilchen dreht sich auf seinem Platze nur in die Richtung der Kraftlinie, bewegt sich aber nicht längs derselben.

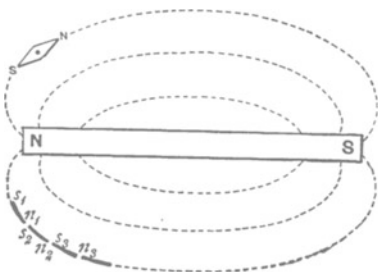


Fig. 2.

Wir können auf diese Weise jedes Eisentheilchen, welches auf dem Papier liegt, als eine sehr kurze Magnetnadel betrachten und jede Kraftlinie als eine Kette solcher Nadeln, deren Glieder mit ihren entgegengesetzten Polen $n_1\,s_2$, $n_2\,s_3$, $n_3\,s_4$ u. s. w. zusammenhängen, wie Fig. 2 zeigt. Denken wir uns nun, dass die Glieder einer solchen Kette, während sie sich noch unter der Einwirkung des Magnets befinden, durch ein Verfahren plötzlich hart wie Stahl würden oder dass wir gleich von Anfang an Stahlspähne genommen hätten. Würde der Magnet alsdann entfernt, so hätten wir eine Reihe kleiner Magnete erhalten, deren Pole von entgegengesetztem Zeichen sich berühren und die sich deshalb mit Ausnahme des ersten und letzten Theilchens der Kette aufheben. Wir hätten einen freien Nordpol an dem einen Ende und einen freien Südpol an dem andern, welche, um eine endliche Strecke von einander entfernt, eine magnetische Wirkung auf andere Eisenstücke in ihrer Nachbarschaft ausüben könnten. Würde jedes Theilchen um seinen Mittelpunkt gedreht (ohne indessen verschoben zu werden), so dass der

Zusammenhang mit dem benachbarten Theilchen aufgehoben wird, so hätten wir eine unterbrochene Linie sehr kleiner Magnete (Fig. 3), von denen keiner eine magnetische Anziehung oder Abstossung in die Ferne ausüben kann, weil die beiden entgegengesetzten Pole jedes Theilchens von einem äussern Punkte, auf den eine Wirkung ausgeübt werden soll, fast gleich weit abständen, und folglich die beiden entgegengesetzten Kräfte im Gleichgewicht wären. Indem wir jedes Theilchen also soweit drehen, dass es mit den benachbarten den Zusammenhang verliert, haben wir vollständig die Fernwirkung unserer Kette zerstört. Wenn wir nur einige der Theilchen drehen oder alle nur um einen sehr kleinen Winkel, so dass die magnetische Kette nicht vollständig unterbrochen wird, so wird der

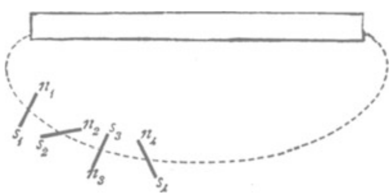


Fig. 3.

Magnetismus der ganzen Kette zwar geschwächt, aber nicht vollständig zerstört. Wir können unsere magnetische Kette dadurch wiederherstellen, dass wir jedes Theilchen in seine ursprüngliche Lage zurückdrehen, und da dies Verfahren zu mühsam ist, als dass es sich mit der Hand ausführen liesse, so können wir es augenblicklich dadurch vollziehen, dass wir unsern Magnet wieder unter das Papier legen, so dass die bestimmte Kraftlinie, welche der Kette der Theilchen entspricht, wieder durch sie hindurchgeht und jedes Theilchen wieder in die tangentiale Richtung zieht. Hierdurch kommen entgegengesetzte Pole wieder zur Berührung und heben so einander auf, mit Ausnahme der beiden freien Pole an den Enden der Kette.

Nach der modernen Theorie des Magnetismus, wie sie von Weber, Wiedemann, Hughes, Ewing und andern entwickelt ist, tritt das, was hier bei einer Kette von Eisenfeilspähnen beschrieben ist, wirklich in einem Eisen- oder Stahlstück ein, während es magnetisirt wird. Nach dieser Theorie ist jedes Eisen- oder Stahlmolekül ein vollständiger Magnet; es ist an einem Ende mit einer bestimmten Quantität magnetischer Masse des einen Zeichens versehen, an dem andern Ende mit genau derselben Quantität magnetischer Masse des entgegengesetzten Zeichens. Diese magnetischen Massen sind eine der Materie inhärente Eigenschaft, wie die Schwere oder die chemischen und thermischen Eigenschaften, und können weder kleiner noch grösser werden. In einem unmagnetischen Stahlstabe bilden die Molekularmagnete entweder in sich geschlossene oder getrennte Ketten, deren magnetische Achsen nach allen möglichen Richtungen laufen; sie üben deshalb keine magnetische Fernwirkung aus, wie es bei unserer Kette von Eisenfeilspähnen der Fall war, nachdem wir die einzelnen Glieder gedreht hatten. Aber wenn es durch irgend ein Mittel möglich ist, alle Moleküle so zu drehen, dass sie nach einer Richtung zeigen, ohne sie dabei zu verschieben, so erhalten wir eine Anzahl paralleler magnetischer Ketten, die nur an ihren Enden freien Magnetismus aufweisen und eine magnetische Anziehung und Abstossung in die Ferne ausüben können, d. h. unser Stahlstab wird ein Magnet.

Wir sehen, dass nach dieser Theorie die Moleküle, welche einen Stab von magnetisirbarem Stahl zusammensetzen, um ihre Mittelpunkte drehbar sein müssen, und je leichter und vollständiger sie sich drehen lassen, um so schneller steigt die Magnetisirung an. Da wir nicht jedes Molekül anfassen und mechanisch drehen können, so schicken wir Kraftlinien durch den Stab, um diese Arbeit auszuführen, wie wir es bei der Kette der Eisenfeilspähne machten. Dieses geschieht entweder mit Hülfe eines andern Magnets oder mittelst des elektrischen Stromes. Die Anordnung der Moleküle in vollständigen Ketten wird desto vollkommener sein, je geringer der Widerstand oder die innere Reibung ist, welche sich der Drehung entgegenstellen, und je kräftiger die Kraftlinien sind, welche durch den Stahlstab hindurchgehen. In sehr weichem Stahl oder weichem Eisen drehen sich die Moleküle frei, und hier können sie vollständig in stetige Ketten gebracht werden; aber je härter der Stahl ist, um so kleiner ist der Winkel, um den jedes Molekül gedreht werden kann, und eine um so grössere magnetisirende Kraft ist hierzu erforderlich. In solchen Fällen sind die magnetischen Ketten mehr oder weniger unterbrochen, und der nach aussen hin wirkende Magnetismus ist schwächer. Anderseits werden die einmal in die Lage der magnetischen Kontinuität gedrehten Moleküle nicht leicht wieder gestört; je härter der Stahl ist, um so permanenter ist also sein Magnetismus. In weichem Eisen werden die Moleküle ihren magnetischen Zusammenhang ebenso leicht verlieren, als er gewonnen ist, und die leiseste mechanische Erschütterung reicht hin, um den grössten Theil des Magnetismus zu zerstören.

Um dies anschaulich zu machen, nehmen wir eine Glasröhre, die mit Eisenfeilspähnen lose gefüllt ist, und magnetisiren sie durch Streichen mit einem Magnetpol. Wir sehen alsdann, dass die Eisentheilchen, welche anfangs in allen möglichen Richtungen lagen, sich mehr oder weniger parallel zu der Längsrichtung der Röhre lagern, sodass das Ganze das Ansehen eines festen Eisenstückes von stark sehniger Beschaffenheit bekommt. Die Röhre ist ein Magnet geworden, und wenn sie sorgfältig behandelt und die Anordnung der Theilchen nicht gestört wird, so kann man sie wie einen festen Stahlmagnet verwenden und alle gewöhnlichen Erscheinungen der Anziehung und Abstossung in die Ferne erhalten. Schüttelt oder stösst man aber die Röhre, so gleiten die Theilchen in ihre anfängliche unregelmässige Lage zurück, und es verschwinden alle Spuren von freiem Magnetismus.

Aus diesem kurzen Abriss der Molekular-Theorie des Magnetismus sieht man, dass wir nur dadurch auf die Moleküle im Innern eines Eisen- oder Stahlstabes wirken können, dass wir ihn von Kraftlinien durchdringen lassen. Je grösser die Zahl der Kraftlinien ist, um so kräftiger sind die Ketten, zu denen sich die Moleküle des Stabes zusammenschliessen — oder mit andern Worten, je grösser die magnetisirende Kraft, um so grösser ist die Anzahl der Moleküle, welche sich in Folge dessen in mehr oder weniger vollständigen magnetischen Ketten anordnen. Wenn das Metall hart genug ist, so werden diese Ketten wieder ihrerseits der Sitz und die Quelle von Kraftlinien und können zur Magnetisirung anderer Stäbe verwandt werden.

Streng genommen ist jeder Magnet von Kraftlinien umgeben, die sich über den ganzen unendlichen Raum erstrecken, aber praktisch kann man sie nur in dem Raume zeichnen, der den Magnet unmittelbar umgiebt. Diesen nennt man *magnetisches Feld.* Mit Hülfe der oben eingeführten Vorstellung von den magnetischen Kraftlinien können wir weiter auf einfache Art die Stärke des magnetischen Feldes in einem gegebenen Punkte ausdrücken. Wir können entweder annehmen, dass die Kraftlinien verschiedene Stärke besitzen und dass die mechanische Kraft, mit der ein gegebener freier Magnetpol sich längs irgend einer Kraftlinie bewegt, von der Stärke dieser Kraftlinie abhängig ist, die von derjenigen einer andern zu demselben Felde gehörenden Kraftlinie verschieden sein kann, oder wir könnten festsetzen, dass alle Kraftlinien dieselbe Stärke besitzen, dass sie aber an verschiedenen Stellen des Feldes in verschiedener Dichte verlaufen. Nach der letzten Annahme ist die Feldstärke an einer gegebenen Stelle oder die mechanische Kraft, die auf einen freien Magnetpol ausgeübt wird, proportional der Anzahl von Einheitslinien, die an der betreffenden Stelle durch die Einheit der Fläche hindurchgehen. Es ist dies die zweckmässigere Art, die Grösse der mechanischen Kräfte zu schätzen, welche durch das magnetische Feld hervorgerufen werden, aber man darf sie als keine geometrisch wahre Darstellung ansehen. Es geht dies aus folgender Betrachtung hervor. Setzen wir voraus, dass eine mechanische Kraft nur durch Kraftlinien ausgeübt wird, die wirklich den Magnetpol durchsetzen, so kann durch den magnetischen Pol, der ein mathematischer Punkt ist, nur eine Linie hindurchgehen und eine mechanische Kraft ausüben. Diese Kraft würde deshalb von der Dichte der Linien in der Nachbarschaft des Poles ganz unabhängig sein. Wenn aber der Pol bei gleicher Stärke endliche Dimensionen hat, so gehen in Wirklichkeit mehr Linien durch ihn hindurch, und es würde eine grössere mechanische Kraft ausgeübt. Das Experiment zeigt indessen, dass dies nicht der Fall ist und dass die mechanische Kraft innerhalb vernünftiger Grenzen von der Ausdehnung des Pols unabhängig ist und nur von dessen freiem Magnetismus abhängt. Hieraus schliessen wir, dass eine strenge geometrische Vorstellung von der Dichte der Linien in einem magnetischen Felde in derselben Weise, wie wir uns die Dichte von Bäumen in einem Walde denken, falsch sein würde. Wir können das Problem, eine geometrische Darstellung der magnetischen Feldstärke für unsere Auffassung zu finden, nicht lösen und müssen uns begnügen, den Begriff in dem festgesetzten Sinne zu gebrauchen. Keinem ist es bis jetzt gelungen, die Wirkung der Schwere zu erklären und sie anschaulich darzustellen. Nichtsdestoweniger ist es für uns nicht schwierig, die gebräuchlichen Ausdrücke der Beschleunigung, der Masse und des Gewichts der Körper in unsern Berechnungen anzuwenden. Wir wissen, dass das Gewicht eines Körpers gleich dem Produkt seiner Masse und der Beschleunigung ist, die von der Schwere herrührt. Wenn wir Polstärke statt Masse und Feldstärke statt Beschleunigung der Schwere setzen, so finden wir das Analogon für das Gewicht, nämlich die mechanische Kraft, die auf einen freien Magnetpol wirkt, wenn er in das magnetische Feld gebracht wird.

Aus dem oben Gesagten geht hervor, dass wir als *Einheit der magnetischen Feldstärke* diejenige definiren müssen, welche auf einen freien Magnetpol von der Einheit der Stärke mit der Einheit der Kraft wirkt. Um den Magnetpol von der Einheit der Polstärke festzusetzen, müssen wir auf den bekannten Ausdruck für die mechanische Anziehung und Abstossung zurückgehen, welche zwischen zwei um einen gewissen Abstand von einander entfernten Polen besteht. Das Gesetz ist auf experimentellem Wege mittelst der Drehwage von Coulomb gefunden und von Gauss bestätigt, der hierzu einen grossen festen Magnet und eine kleinere aufgehängte Magnetnadel anwandte. Es heisst folgendermaassen: Wenn wir mit M und m die Stärke zweier Pole bezeichnen, welche sich in der Entfernung r von einander befinden, so ist die mechanische Kraft (Anziehung oder Abstossung, je nachdem die Pole von entgegengesetztem oder gleichem Zeichen sind), welche sie auf einander ausüben, gleich $\frac{Mm}{r^2}$. Wenn beide Pole gleich sind und die Stärke m besitzen, so haben wir $\frac{m^2}{r^2}$, und wenn ihre Entfernung gleich der Längeneinheit wird, so ist die zwischen ihnen wirkende Kraft gleich dem Quadrat des freien Magnetismus eines Pols. Diese Kraft wird gleich der Einheit, wenn der freie Magnetismus Eins wird. Wir finden deshalb, dass *der Pol von der Einheit der Polstärke ein solcher ist, der in der Einheit der Entfernung den gleichen Pol mit der Einheit der Kraft anzieht oder abstösst.* Wir haben nun noch die Einheit der Kraft und die Einheit der Länge zu definiren. Es kann dies auf Grund eines passenden Maasssystems für Masse, Länge und Zeit geschehen. Bei den elektrischen Berechnungen ist es gebräuchlich, für diesen Zweck

das Gramm als Einheit der Masse,
das Centimeter als Einheit der Länge und
die Sekunde als Einheit der Zeit

zu gebrauchen.

Auf diesen Einheiten beruht das *absolute elektromagnetische Maasssystem.* Wenn wir diese Einheiten unseren Berechnungen zu Grunde legen, so können wir alle andern Maasseinheiten daraus ableiten, weil sie alle auf irgend eine Art mit den Fundamentaleinheiten der Masse, Länge und Zeit verknüpft sind. Wir finden auf diese Weise, dass die Einheit der Geschwindigkeit ein Centimeter in der Sekunde ist und die der Beschleunigung ein Geschwindigkeitszuwachs von einem Centimeter in der Sekunde. Da mechanische Kräfte durch das Produkt von Masse und Beschleunigung gemessen werden, so definiren wir die Einheit der mechanischen Kraft, die *Dyne*, als diejenige Kraft, welche auf die Masse von einem Gramm eine Sekunde lang wirkend, dieser eine Geschwindigkeit (oder Beschleunigung seiner Geschwindigkeit) von einem Centimeter in der Sekunde ertheilt. Die mechanische Energie, welche durch die Kraft von einer Dyne auf dem Wege von einem Centimeter hervorgerufen wird, ist die Einheit der Energie und wird das *Erg* genannt.

Nachdem wir diese fundamentalen und die daraus abgeleiteten Einheiten angenommen haben, können wir dazu übergehen die Einheiten für die Kraftlinien und für die Stärke des magnetischen Feldes festzulegen. Wir sagen, die *Kraftlinie* hat die Stärke Eins, wenn ein auf sie gebrachter Einheitspol mit der Kraft einer Dyne sich längs derselben fortbewegt. Die *Einheit der magnetischen Feldstärke* herrscht dort, wo auf den Einheitspol die Kraft einer Dyne wirkt. Wenn wir durch den Versuch finden, dass die gleiche Kraft an allen Punkten eines gewissen Theiles des Feldes herrscht (wie es bei dem magnetischen Felde der Erde innerhalb gewisser Grenzen der Fall ist), so sagen wir, dass dieser besondere Theil des Feldes von gleichförmig magnetischer Stärke ist, und sehen alle Kraftlinien als gerade, parallel und gleich weit von einander entfernt an. Ein *gleichförmiges magnetisches Feld von der Einheit der Stärke* ist deshalb ein solches, wo jedes Quadratcentimeter des Querschnittes rechtwinklig von einer einzigen Kraftlinie geschnitten wird.

Wir können nun die Zahl der Einheiten von Kraftlinien bestimmen, die von einem freien Einheitspol ausgehen. Vorher sind jedoch einige Erklärungen erforderlich, die sich auf den Begriff eines freien Magnetpols beziehen. Wie oben gezeigt, lassen sich Magnete dadurch herstellen, dass man ihre Moleküle in ununterbrochenen Ketten anordnet. Hierbei werden gleiche Mengen magnetischer Massen entgegengesetzten Zeichens an den Polen des Magnets hervorgerufen. Der Versuch lehrt, dass es physikalisch unmöglich ist, einen Magnet mit nur einem Pol zu erzeugen und dass deshalb ein freier Magnetpol in der Natur nicht existiren kann. Aber wir können einen freien Pol angenähert herstellen, wenn wir den Magnet verhältnismässig lang machen. Alsdann macht sich nur der magnetische

Einfluss des einen Poles innerhalb der Entfernung bemerkbar, die kleiner als die Länge des Magnets ist, und wenn wir die magnetischen Eigenschaften der unmittelbaren Umgebung des Poles untersuchen, so können wir den störenden Einfluss des andern Pols vernachlässigen. In diesem Falle sind die Kraftlinien, welche von dem betreffenden Pol ausgehen, gerade Linien, die sich von ihm strahlenförmig in den Raum ausbreiten. Es möge P in Fig. 4 der Pol sein und S eine Kugelfläche, welche um den Pol als Mittelpunkt gelegt ist. Alsdann wird diese Kugel von den Kraftlinien in Punkten geschnitten, welche alle vom Pol gleich weit entfernt sind. Es möge r diese Entfernung und M die Stärke des Poles sein; die mechanische Anziehung, welche auf den Einheitspol von entgegengesetztem Zeichen ausgeübt wird, wenn dieser sich auf der Kugeloberfläche befindet,

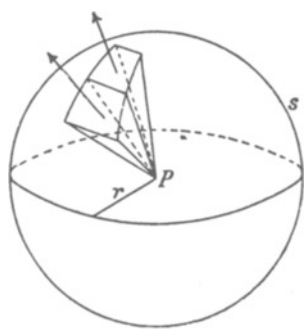


Fig. 4.

ist alsdann gleich $\frac{M}{r^2}$. Wenn man nun um den Pol als Mittelpunkt eine zweite Kugelfläche beschreibt, deren Radius um eine unendlich kleine Grösse länger als r ist, so hat man eine Kugelschale von unendlich geringer Dicke, innerhalb deren die Feldstärke gleichförmig ist. In welchen Punkt zwischen den beiden Flächen der Schale wir unsern Einheitspol auch bringen mögen, er wird stets mit derselben Kraft von P angezogen; hieraus lässt sich schliessen, dass die Dichtigkeit der Linien auf der ganzen Kugeloberfläche gleichförmig sein muss. Da in einem gleichförmigen Felde die auf den Einheitspol in der Richtung der Kraftlinien ausgeübte Kraft gleich ihrer Dichte ist (oder gleich der Anzahl der Kraftlinien, die auf das Quadratcentimeter des Querschnitts kommt), so schliessen wir, dass durch jedes Quadratcentimeter der Kugeloberfläche $\frac{M}{r^2}$ Kraftlinien hindurchgehen. Nun ist die ganze Kugeloberfläche vom Radius r gleich $4\pi r^2$, und folglich die gesammte Anzahl der Kraftlinien, die von dem Pol M ausgehen:

$$4\pi r^2 \frac{M}{r^2} = 4\pi M.$$

Wenn der Pol P statt der Stärke M die Stärke Eins hätte, so wäre die gesammte Anzahl der Kraftlinien offenbar 4π, und wir finden auf diese Weise eine zweite Definition für den *Einheitspol:* es ist dies ein Pol von solcher Stärke, dass 4π Kraftlinien von ihm ausgehen. Diese Definition würde offenbar mit der folgenden identisch sein: *Der Einheitspol bringt in der Einheit der Entfernung die Einheit der Feldstärke hervor.*

Fig. 5.

Bisher haben wir nur über Magnete gesprochen und über die mechanischen Kräfte, welche von ihnen ausgeübt werden. Es ist nun nöthig, die Beziehung zwischen einem elektrischen Strom und der mechanischen Kraft zu untersuchen, welche dieser ausübt, wenn er in ein magnetisches Feld gebracht wird. Wie vorher, bilden experimentelle Thatsachen die Grundlage unserer Untersuchungen. Es sei a in Fig. 5 der Querschnitt eines Drahtes, der vertikal durch die Fläche des Papiers geht. Es möge in dem Drahte ein Strom fliessen. Wenn wir in der Nähe des Drahtes Eisenfeilspähne auf das Papier streuen, so ordnen sich diese in koncentrischen Kreisen um denselben an, und wenn wir das Papier längs dem Draht verschieben, so finden wir stets dasselbe Resultat. Aus diesem Versuch schliessen wir, dass der Draht in seiner ganzen Länge von kreisförmigen Kraftlinien, oder wie man oft sagt, von einem magnetischen Wirbel umgeben ist.

Wenn wir einen langen dünnen Magnet parallel zum Draht aufhängen, so dass sich sein unteres Ende frei über der Papieroberfläche bewegen kann, so hat dies das Bestreben, sich um den Draht zu drehen, aber eine dauernde Rotation kann nicht eintreten, da das obere Ende des Magnets sich im entgegengesetzten Sinne um den Draht zu drehen sucht. Wenn eine kurze, in ihrem Mittelpunkt aufgehängte Magnetnadel horizontal über dem Papier schwebt, so stellt sie sich tangential zu den Kraftlinien, also rechtwinklig zum Draht. Jeder Kreis von Eisenfeilspähnen muss als eine in sich geschlossene Kette kleiner Magnete betrachtet werden, und wenn wir einen Stahlring um den Draht legen würden, so würde dieser ein geschlossener Magnet werden. Nach seiner Entfernung würde er zwar keinen nach aussen wirkenden Magnetismus zeigen, da sich seine Moleküle alle mit entgegengesetzten Polen berühren; unterbrechen wir jedoch den Zusammenhang, indem wir den Ring an einer Stelle aufschneiden und der Länge nach strecken, so zeigen die getrennten Enden verschiedene Polarität. Legen wir statt eines vollständigen Ringes nur ein Segment eines solchen oder ein gerades Stahlstück rechtwinklig zu dem Draht hin, so werden beide nach ihrer Entfernung magnetische Eigenschaften zeigen. Wir lernen aus diesen Versuchen, dass es möglich ist, ein Stahlstück zu magnetisiren, wenn man in seiner Nähe und rechtwinklig zu seiner Längsrichtung einen elektrischen Strom vorbeigehen lässt. Alle diese Versuche gelingen ebenso gut bei einem gebogenen Draht; wenden wir eine Drahtrolle an, in die wir rechtwinklig zu ihrer Windungsebene ein Stahlstück bringen, so wird dessen Magnetismus bedeutender werden, als wenn wir nur einen einzigen geraden Draht anwenden.

Fig. 6 giebt eine deutliche Vorstellung von den Kraftlinien, die eine kreisförmige, vom Strom durchflossene Windung umgeben. Die Zink- und Kupferplatte eines galvanischen Elements sind durch einen kräftigen, kreisförmigen Draht verbunden. Da alle Kraftlinien um den Draht im gleichen Sinne laufen, so folgt, dass der ganze innere Raum des Kreises mit einem Bündel von Kraftlinien angefüllt ist, die auf seiner Ebene senkrecht stehen. Ein freier Magnetpol würde deshalb in den Kreis in dem einen oder andern Sinne hineingezogen werden, je nach dem Zeichen des Pols und der Richtung des Stroms. Wird eine kleine Magnetnadel in dem Mittelpunkt aufgehängt, so wird sie sich rechtwinklig zur Ebene des Kreises stellen und die Richtung, in welcher der Nordpol sich bewegt, ist durch die folgende, von Ampère herrührende Regel bestimmt: *Man denke sich eine menschliche Figur, welche mit dem Strom schwimmend nach der Nadel* *sieht; alsdann wird der Nordpol nach derjenigen Seite abgelenkt, die durch die ausgestreckte linke Hand bezeichnet wird.* Wenn wir statt der Magnetnadel ein unmagnetisches Stück Stahl in dieselbe Lage bringen, so wird es magnetisirt, und es entsteht ein Nordpol an der linken, ein Südpol an der rechten Seite. Nähern wir dem Stromkreise von vorn, also von der Seite, die dem Beschauer der Figur zugewendet ist, den Nordpol eines Magnets, so wird er offenbar abgestossen, nähern wir dagegen den Südpol, so wird dieser angezogen. Das Umgekehrte findet auf der Rückseite statt.

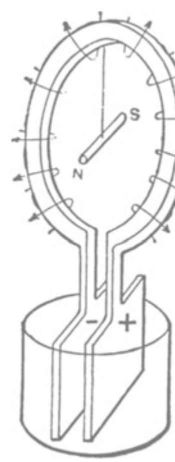


Fig. 6.

Dasselbe würde eintreten, wenn wir statt des vom Strom durchflossenen Drahtkreises einen sehr kurzen Magnet von gleichem Durchmesser hätten. Um diesen Magnet ebenso wie den Draht wirken zu lassen, müsste seine Länge gleich der Dicke des Drahts sein. Wir hätten also eine flache Scheibe, deren eine Seite wir uns mit nordmagnetischer Masse, die andere mit der gleichen Menge südmagnetischer Masse belegt denken müssen. Indem wir den Betrag des über die Scheibe vertheilten Magnetismus passend wählen, erhalten wir einen Magnet, welcher sich in seiner Fernwirkung gerade so verhält wie der Kreisstrom. Ein solcher Magnet wird die *äquivalente magnetische Doppelfläche* genannt. Die Wirkung, welche ein physikalischer Magnet oder eine magnetische Doppelfläche, die einem geschlossenen Stromkreis äquivalent ist, in die Ferne ausübt, wird am passendsten durch das *magnetische Moment* ausgedrückt. Es ist dies das Produkt von Polstärke und Entfernung der beiden Pole. Ein Magnet von 1 cm Länge, dessen Pole die Einheit der Stärke besitzen, hat die Einheit des Moments. Der Versuch zeigt, dass das magnetische Moment eines geschlossenen ebenen Kreisstromes gleich dem Produkt der vom Strom umflossenen Fläche und der Stromstärke ist, deren Einheit wir daher folgendermassen definiren können: *In einem ebenen Stromkreis fliesst ein Strom von der Einheit der Stromstärke, wenn seine Wirkung einer magnetischen Doppelfläche äquivalent ist, deren Moment numerisch gleich der Fläche des Stromkreises ist.* Es seien in Fig. 7 a und b Querschnitte eines kreisförmigen Leiters vom Radius r, welcher vom Strom i durchflossen ist, und m ein Magnetpol, der um die Strecke a vom Mittelpunkt des Drahtkreises entfernt ist. Alsdann ergiebt das Experiment, dass

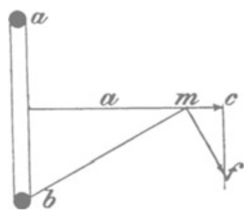


Fig. 7.

jedes Leiterelement auf den Magnetpol eine Kraft ausübt, die proportional dem Produkt aus Stromstärke und Länge des Elements ist und deren Richtung rechtwinklig auf der Ebene steht, welche durch das Element und den Magnetpol geht. Die Kraft, welche von dem in b befindlichen Element dl herrührt, sei mf; ihre Grösse ist mithin

$$dF = \frac{i m \, dl}{a^2 + r^2}.$$

Die horizontale Komponente dieser Kraft ist offenbar

$$dH = dF \frac{r}{\sqrt{a^2 + r^2}} = \frac{i m r \, dl}{(a^2 + r^2)^{3/2}},$$

und da dasselbe für jedes Element längs der ganzen Kreisperipherie gilt und wir für dl den Ausdruck $r \, d\varphi$ setzen können, so finden wir die ganze Kraft durch Integration zwischen den Grenzen 0 und 2π, also

$$H = \frac{imr^2}{(a^2+r^2)^{3/2}} \int_0^{2\pi} d\varphi = \frac{2\pi i m r^2}{(a^2+r^2)^{3/2}}.$$

Wenn der Magnetpol im Mittelpunkt des Kreises liegt, so ist $a=0$, und wir haben

$$H = \frac{2\pi i m}{r}.$$

Diese Gleichung enthält noch eine andere Definition für die Einheit der Stromstärke. Wenn nämlich m, r und i gleich der Einheit werden, wird H gleich 2π, sodass *derjenige Strom die Einheit der Stromstärke besitzt, welcher in einem Kreise vom Radius gleich der Längeneinheit fliessend auf den in seinem Mittelpunkt befindlichen Einheitspol eine Kraft von 2π Dynen ausübt.*

Wenn ein Magnet in eine Drahtspule geschoben wird, die mit einem empfindlichen Galvanometer verbunden ist, so beobachtet man, dass für kurze Zeit ein Strom hindurchfliesst, und wenn der Magnet wieder aus der Rolle herausgezogen wird, so entsteht ein momentaner Strom von entgegengesetzter Richtung. Da es unmöglich ist, dass ein Strom ohne eine elektromotorische Kraft im Kreise entsteht, so schliessen wir, dass, sobald wir einen Magnet in eine Spule schieben oder aus ihr herausziehen, eine elektromotorische Kraft in der einen oder andern Richtung in dem Drahte selbst hervorgerufen wird. Um diese Erscheinung zu erklären, gehen wir auf den Begriff der Kraftlinien zurück. Nähern wir den Magnet der Drahtspule, so bewegen wir offenbar nicht allein das Metall, sondern auch alle Kraftlinien, welche es umgeben; in Folge dessen bewirken wir, dass diese Linien oder ein Theil derselben den Draht der Spule schneiden. Dasselbe geschieht, wenn der Magnet in Ruhe bleibt und die Drahtspule gegen ihn bewegt wird; auch dann schneidet der Draht Kraftlinien, wodurch eine elektromotorische Kraft hervorgerufen wird. Wir können die Ursache dieser Wirkung nicht erklären, müssen uns vielmehr damit begnügen, dass sie sich jederzeit durch den Versuch beweisen lässt. Eine genauere Untersuchung zeigt ferner, dass die Stromstärke und folglich auch die Grösse der elektromotorischen Kraft der Geschwindigkeit der Bewegung und der Stärke des Magnets direkt proportional ist. Wir schliessen daraus, dass die elektromotorische Kraft der Zahl der in der Sekunde von jedem Draht geschnittenen Kraftlinien proportional ist. Sie ist natürlich auch der Anzahl der Drahtwindungen auf der Spule proportional.

Schieben wir den Magnet in die Spule, so beobachten wir einen Widerstand, der einen Aufwand von mechanischer Energie erforderlich macht, deren Grösse dem Produkt aus Stromstärke und elektromotorischer Kraft proportional ist. Dieser Widerstand und die mechanische Energie, die nöthig ist, um ihn zu überwinden, sind um so grösser, je kleiner der elektrische Widerstand der Spule ist, vorausgesetzt, dass alles übrige gleich bleibt. Wenn die Spule offen ist, so dass kein Strom entstehen kann, so giebt es auch keine Kraft, die der Bewegung des Magnets entgegenwirkt.

Um zu untersuchen, wie durch die Bewegung eines Leiters in einem magnetischen Felde eine elektromotorische Kraft entsteht, nehmen wir den einfachsten Fall an, nämlich ein gleichförmiges Feld, dessen Kraftlinien wir uns vertikal verlaufend denken. Zwei metallische Stäbe sollen horizontal in gleicher Entfernung und zu einander parallel befestigt sein, und ein dritter Stab, welchen wir den Schlitten nennen wollen, liege rechtwinklig über jenen ersten Stäben und bewege sich immer parallel zu sich selbst, aber so, dass er jene stets berührt. Sobald der Schlitten in Bewegung gesetzt wird, entsteht eine Potentialdifferenz an seinen Enden, welche bewirkt, dass Elektricität von der Stelle höhern Potentials zu derjenigen niedrigern Potentials fliesst. Dieser Strom kann wirklich beobachtet werden, wenn die Stäbe mit einem Galvanometer verbunden sind. Es sei l die Entfernung der Stäbe, v die Geschwindigkeit des Schlittens und F die Feldstärke. Alsdann ist Flv die Potentialdifferenz zwischen den Stäben oder die Anzahl der Kraftlinien, die der Schlitten in der Sekunde schneidet. Wenn die Entfernung der Stäbe ein Centimeter, die Geschwindigkeit ein Centimeter in der Sekunde beträgt und die Feldstärke gleich Eins ist, so erhalten wir die Einheit der elektromotorischen Kraft. Wir definiren deshalb *als Einheit der elektromotorischen Kraft diejenige, welche entsteht, wenn der Leiter sich so in einem magnetischen Felde bewegt, dass er in der Sekunde eine Kraftlinie schneidet.* Nehmen wir an, dass die Stäbe und das damit verbundene Galvanometer gar keinen elektrischen Widerstand haben, dass der Schlitten aber den Widerstand w hat, so ist nach dem Ohm'schen Gesetz der während der Bewegung des Schlittens in dem Kreis erzeugte Strom gleich

$$i = \frac{F\,l\,v}{w}.$$

Wenn die Feldstärke gleich der Einheit ist ($F = 1$) und die Stäbe ein Centimeter von einander entfernt sind, so wird die Einheit des Stromes bei der Geschwindigkeit $v = w$ hervorgerufen. Wir finden hier also, dass der elektrische Widerstand des Schlittens und damit der elektrische Widerstand jedes Leiters durch dieselben Grössen wie eine Geschwindigkeit ausgedrückt werden kann, und können deshalb sagen, dass der Widerstand eines Leiters so und so viele Centimeter in der Sekunde beträgt. Man giebt gewöhnlich die Grösse der Widerstände bezogen auf eine praktische Einheit, das *Ohm*, an. Die Beziehung zwischen diesem und der Einheit des Widerstandes in absolutem Maass wollen wir später erklären, vorher müssen wir noch einige Worte über die Energie sagen, die für die Bewegung des Schlittens erforderlich ist, und über die Beziehung zwischen Strom und mechanischer Kraft.

Es sei P die Kraft in Dynen, welche nöthig ist, um den Schlitten über die Kraftlinien des Feldes von der Stärke F mit einer Geschwindigkeit von v cm in der Sekunde zu bewegen. Die in der Zeiteinheit geleistete Energie ist dann offenbar

$$A = P\,v.$$

Nach dem Princip von der Erhaltung der Kraft muss diese gleich der erzeugten elektrischen Energie sein. Die Aufgabe, welche sich nun von selbst darbietet, ist die Bestimmung der elektrischen Energie eines Stromes i, der in Folge der Potentialdifferenz $F\,l\,v$ entsteht. Wir haben bis jetzt den Ausdruck Potential gebraucht, ohne ihn zu definiren. Das Potential eines Körpers ist seine Eigenschaft, potentielle Energie zu besitzen, welche später Arbeit leisten kann. Wenn ein Gewicht von einem gegebenen festen Niveau auf eine gewisse Höhe gehoben wird, so wird hierbei mechanische Arbeit verzehrt, die man wiedererhält, sobald man das Gewicht fallen und dabei den Widerstand irgend einer Maschine überwinden lässt, welche Arbeit leistet. In seiner gehobenen Lage hat daher das Gewicht eine gewisse potentielle Energie, welche gleich dem Produkt des Gewichts und der Höhe ist, auf die es gehoben wurde. Wenn das Gewicht gleich der Einheit ist, so ist das Produkt numerisch gleich der Höhe, und wir können sagen, dass das mechanische Potential eines schweren

Körpers, der bis zu einer gewissen Höhe über ein gegebenes Niveau gehoben ist, gleich der mechanischen Energie ist, die wir verbrauchten, um das Gewicht Eins auf dieselbe Höhe zu heben. Multipliciren wir das so definirte Potential mit dem Gewicht des Körpers, so erhalten wir die gesammte potentielle Energie, welche er ausüben kann.

Aehnliche Schlussfolgerungen kann man bei der Elektricität anstellen. Es ist hinreichend bekannt, dass zwei Körper, die mit gleichnamiger Elektricität geladen sind, einander abstossen, und wenn einer der beiden Körper fest ist, muss bei Annäherung des andern mechanische Energie für die Bewegung des letztern aufgewandt werden. Diese Energie kann man wieder gewinnen (vorausgesetzt, dass durch Zerstreuung der Elektricität in die umgebende Luft kein Verlust entsteht), sobald sich der bewegliche Körper von dem ruhenden Körper fortbewegt und dabei nützliche Arbeit leistet. Um die Sache zu erläutern, nehmen wir an, dass der ruhende Körper eine sehr grosse metallische Kugel bildet, die mit einer gewissen Menge positiver Elektricität geladen ist, der bewegliche Körper dagegen ein kleines vergoldetes Hollundermarkkügelchen, das mit der Einheit der positiven Elektricität geladen ist. Wir führen deshalb zwei Körper von sehr verschiedener Grösse ein, damit die Ladung des grössern Körpers nicht merkbar durch die Verschiebung des kleinen Körpers beeinflusst wird. Wenn wir das Hollundermarkkügelchen unendlich weit entfernen, so dass es sich vollständig ausserhalb des Wirkungskreises des grössern Körpers befindet, so entspricht seine Lage der des Einheitsgewichts auf dem gegebenen Niveau. Nähern wir nun das Hollundermarkkügelchen der grossen Kugel, so müssen wir mechanische Arbeit leisten, und nach Lord Kelvin's Definition wird das elektrische Potential der Kugel durch die Grösse der aufgewendeten mechanischen Arbeit gemessen. Gehen wir statt aus unendlicher Entfernung von einer andern Kugel aus, die ein von der ersten verschiedenes Potential hat, so würde die für die Uebertragung des Hollundermarkkügelchens aufgewandte Arbeit ein Maass für den Unterschied des Potentials der beiden Kugeln sein. Es leuchtet von selbst ein, dass die mechanische Energie in demselben Verhältnisse wächst, wenn wir statt eines Kügelchens zwei, drei oder mehr fortbewegen, oder wenn die Ladung desselben statt einer Einheit der Elektricität zwei, drei und mehr Einheiten beträgt. Hieraus folgt, dass die mechanische Arbeit, welche erforderlich ist, um q Einheiten der Elektricität von einer Kugel oder einem Punkte mit dem Potential p_1 zu einer Kugel oder einem Punkte mit dem Potential p_2 hinzubewegen, gleich

$$- q (p_1 - p_2)$$

ist.

Dies Resultat erfährt keine Aenderung, wenn die Bewegung der Elektricität nicht mittelst unseres Hollundermarkkügelchens stattfindet, das mit einer gewissen elektrischen Ladung q versehen ist, sondern mittelst eines Drahtes, in dem ein kontinuirlicher Strom fliesst. Denn dieser kann als eine Reihe von Hollundermarkkügelchen angesehen werden. Bei unserm Versuche mit dem Schlitten ist i die Stromstärke oder die in einer Sekunde übertragene Elektricitätsmenge, und die mechanische Arbeit, welche ihr entspricht, ist deshalb

$$i F l v.$$

Nach dem Princip von der Erhaltung der Kraft muss dieser Werth gleich der mechanischen Energie sein, welche in einer Sekunde aufgewendet wird, um den Schlitten zu bewegen. Wir haben deshalb die Gleichung

$$P = i F l.$$

Bewegt sich also ein gerader Leiter von gegebener Länge, in dem ein Strom von bestimmter Stärke fliesst, in einem gleichförmigen Felde von bekannter Stärke, dessen Kraftlinien auf dem Leiter senkrecht stehen, so übt er eine mechanische Kraft aus, die gleich dem Produkt aus der Länge des Leiters, der Stromstärke und der Feldstärke ist.

Diese Beziehung ist von grösster Wichtigkeit für die Konstruktion der Elektromotoren, da die nach dieser Definition bestimmten mechanischen Kräfte die Leistungen dieser Maschinen angeben. Es ist deshalb wünschenswerth, die oben erhaltene Beziehung noch auf einem andern Wege zu beweisen. Dies kann leicht geschehen, wenn wir auf den Ausdruck für die Kraft zurückgehen, die ein vom Strom durchflossener Leiter auf einen freien Magnetpol ausübt. Wie wir sahen, haben Versuche gezeigt, dass diese Kraft gleich dem Produkt aus der Länge des Leiters, der Stromstärke und der Polstärke, dividirt durch das Quadrat der Entfernung, ist. Wir nehmen hierbei an, dass der Leiter rechtwinklig zu der Linie steht, welche seinen

Mittelpunkt mit dem Pol verbindet, und dass er im Verhältnis zu seinem Abstand von dem Pole sehr kurz ist. Alsdann schneiden alle Graden, welche man vom Pol aus nach den verschiedenen Punkten des Leiters ziehen kann, diesen unter rechtem Winkel. Man kann sie deshalb als parallele Linien betrachten. Der Leiter befindet sich in einem gleichförmigen magnetischen Felde von der Stärke $F = \frac{m}{R^2}$, wo m der Magnetismus des freien Pols und R seine Entfernung vom Leiter ist. Wenn l die Länge des Leiters bezeichnet, i die Stromstärke und P die mechanische Kraft, welche auf den Pol ausgeübt wird, so haben wir

$$P = \frac{m\,i\,l}{R^2},$$

wie wir schon gezeigt haben. Aber da Wirkung und Gegenwirkung gleich sind, so muss der Leiter mit genau derselben Kraft auf den Pol zurückwirken, mit welcher der Pol auf den Leiter wirkt. Die Kraft, welche den Leiter aus der durch ihn und den Pol gelegten Ebene herauszutreiben sucht, ist also gleich P. Setzen wir $\frac{m}{R^2}$ gleich F, so bekommen wir

$$P = i\,F\,l,$$

also dieselbe Gleichung, die wir oben erhalten hatten.

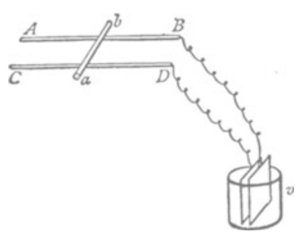


Fig. 8.

Wir kehren nun zu unserm frühern Beispiel zurück. In Fig. 8 sind AB und CD die beiden Stäbe, ab der Schlitten und v ein galvanisches Element, dessen Pole mit den Stäben verbunden sind. Die Kraftlinien, welche nicht gezeichnet sind, sollen vertikal verlaufen, also rechtwinklig zu den Stäben und dem Schlitten. Aus dem oben Gesagten geht hervor, dass der von dem Element ausgehende Strom, welcher durch den Schlitten fliesst, eine Kraft erzeugt, welche diesen auf den Stäben parallel zu sich selbst zu verschieben sucht. Diese Kraft kann man nutzbar machen, indem man ein Seil an dem Schlitten befestigt, welches, über eine Rolle gehend, ein Gewicht heben kann. Es ist dies die einfachste Art, wie man elektrische Energie in mechanische umsetzen kann. Sobald sich der Schlitten bewegt, schneidet er Kraftlinien, und hierdurch wird ein Unterschied des Potentials an seinen Enden hervorgerufen, oder mit andern Worten, der Schlitten wird der Sitz einer elektromotorischen Kraft. Eine kurze Ueberlegung zeigt, dass diese elektromotorische Kraft die entgegengesetzte Richtung haben muss, wie die des Elements. Denn wäre dies nicht der Fall, so würde der ursprüngliche Strom durch die Entstehung der zweiten elektromotorischen Kraft vergrössert; die elektrische und die mechanische Energie würden beide zunehmen, was sich nicht mit dem Princip von der Erhaltung der Kraft verträgt. Wenn in einem Schliessungskreise zwei elektromotorische Kräfte wirken, so ist der Strom, welcher aus ihrer vereinigten Wirkung hervorgeht, proportional ihrer Summe. Da in diesem Falle die elektromotorische Kraft des Schlittens derjenigen des Elements entgegengesetzt ist, so müssen wir sie als negativ betrachten, also als eine *elektromotorische Gegenkraft.* Die Resultante der elektromotorischen Kräfte des Stromkreises ist folglich $E-e$, wenn E die elektromotorische Kraft des Elements und e die des Schlittens bedeutet. Den resultirenden Strom findet man folglich dadurch, dass man $E-e$ durch den Gesammtwiderstand des Schliessungskreises dividirt. Bewegt sich der Schlitten auf den Stäben, so wird dieser Widerstand offenbar stets grösser oder kleiner, je nach der Richtung, in welcher die Bewegung stattfindet. Um die Aufgabe durch die Einführung eines variablen Widerstandes nicht unnütz zu kompliciren, nehmen wir an, dass die Stäbe so dick sind, dass sie keinen nennenswerthen Widerstand besitzen. In diesem Falle wird der gesammte Widerstand nur aus der Summe der Einzelwiderstände von Schlitten, Verbindungsdrähten und Element bestehen. Er sei, wie vorhin, gleich w. Nach dem Ohm'schen Gesetz ist die Stromstärke alsdann

$$i=\frac{E-e}{w}$$

Die mechanische Energie, welche nöthig ist, um das Gewicht P mit der Geschwindigkeit v in der Sekunde zu heben, ist

$$A = P v.$$

Sie muss gleich der elektrischen Energie sein, welche durch das Produkt von Stromstärke und Potentialdifferenz an den Enden des Schlittens dargestellt wird. Es möge F, wie vorher, die Feldstärke und l die Länge des Schlittens bedeuten. Alsdann haben wir

$$A = i F l v$$

oder

$$A = \frac{E - e}{w} F l v,$$

und da $e = F l v$ ist, erhalten wir

$$A = \frac{E - F l v}{w} F l v.$$

Nach unserer letzten Definition der Feldstärke ist F gleich der Anzahl der Kraftlinien, die durch ein Quadratcentimeter der Fläche zwischen den Stäben hindurchgehen, und $l v$ ist die Fläche, welche vom Schlitten in der Sekunde beschrieben wird. $F l v$ ist die Gesammtzahl der Kraftlinien, die der Schlitten in der Sekunde schneidet. Setzen wir diese gleich z, so haben wir für die mechanische Energie, welche das Gewicht heben kann,

$$A = \frac{E - z}{w} z.$$

Diese Gleichung werden wir später bei der Bestimmung der mechanischen Energie benutzen, welche ein Elektromotor liefert. Für den Augenblick ist es zweckmässiger, die Grösse e beizubehalten, und wir bekommen alsdann

$$A = \frac{E - e}{w} e.$$

Da $e = F l v$ und $P = i F l$ ist, so erhält man

$$P = \frac{i e}{v};$$

bei konstanter Geschwindigkeit und konstanter Stromstärke ist also das Gewicht, welches der Schlitten heben kann, und folglich überhaupt seine Fähigkeit, Arbeit zu leisten, der elektromotorischen Gegenkraft direkt proportional. Man sieht ferner, wie falsch es ist, die elektromotorische Gegenkraft als einen Verlust anzusehen; die Konstrukteure, welche Motoren mit möglichst kleiner elektromotorischer Gegenkraft bauen wollen, damit der Strom, der den Motor treibt, nicht schwankt, würden also im günstigsten Falle Maschinen erhalten, die überhaupt keine Arbeit leisten.

Die Energie, welche das Element in der Zeiteinheit erzeugt, ist gleich Ei, die vom Schlitten geleistete ei. Der Wirkungsgrad unseres einfachen Motors ist daher

$$\eta = \frac{e}{E}.$$

Um die Bedingung zu finden, unter der die geleistete Arbeit ein Maximum ist, bilden wir den Differentialquotienten von A und setzen diesen gleich Null. Als Variable betrachten wir hierbei die elektromotorische Gegenkraft e. Dies giebt

$$0 = \frac{dA}{de} = E - e + e\frac{d(E-e)}{de},$$

$$0 = E - 2e,$$

$$e = \frac{E}{2}.$$

Wenn die Geschwindigkeit des Schlittens so geregelt wird, dass seine elektromotorische Gegenkraft gleich der Hälfte der elektromotorischen Kraft des Elements ist, so wird das Maximum der mechanischen Arbeit geleistet und der Wirkungsgrad beträgt in diesem Falle 50 %:

$$A\,\text{max.} = \frac{1}{4}\,\frac{E^2}{w}.$$

Um diese Geschwindigkeit des Schlittens zu erhalten, muss man das an der Schnur befindliche Gewicht P so reguliren, dass

$$v = \frac{E}{2Fl}, \quad P = \frac{E}{2w} \quad \text{und} \quad i = \frac{EFl}{2w}$$

wird.

Ist ein schwereres Gewicht an die Schnur gehängt, so wird die Stromstärke grösser und die Geschwindigkeit kleiner; wählt man ein leichteres Gewicht, so wird die Stromstärke kleiner und die Geschwindigkeit grösser. Nach beiden Richtungen giebt es eine Grenze, auf der einen Seite, wenn das Gewicht Null und die Geschwindigkeit damit ein Maximum wird, auf der andern Seite, wenn das Gewicht so schwer ist, dass der Schlitten still steht, und die Stromstärke ihr Maximum erreicht. Diese Grenzwerthe kann man leicht aus der obigen Formel herleiten.

Es ist nämlich, wenn das Gewicht vollständig entfernt wird,

$$P=0\,,\quad i=0\,,\quad e=E\,,\quad v=\frac{E}{Fl}\,;$$

ist aber das Gewicht so gross, dass der Schlitten still steht, so haben wir

$$P=\frac{EFl}{w}\,,\quad i=\frac{E}{w}\,,\quad e=0\,,\quad v=0.$$

Wenn wir diese Ausdrücke mit denen vergleichen, welche für die Bedingung der maximalen Arbeit gelten, so ergiebt sich, dass im letztern Falle die Stromstärke halb so gross ist als dann, wenn der Schlitten still steht, und dass die Geschwindigkeit halb so gross ist, als wenn der Schlitten sich ohne Gewicht bewegt.

Obgleich diese Untersuchungen auf den ersten Blick etwas sonderbar erscheinen mögen, weil kein Techniker daran denkt, Gewichte durch eine Einrichtung wie die des eben beschriebenen Schlittens zu heben, so sind sie dennoch von grosser praktischer Bedeutung. Denn setzen wir an Stelle des einfachen Schlittens eine Anzahl Drähte auf der Oberfläche des Ankers eines Elektromotors, stellen wir ferner mittelst Stahl- oder Elektromagnete ein sehr starkes Feld her und treffen wir gleichzeitig passende Vorrichtungen, um den Strom der Ankerdrähte zu kommutiren, so können wir die geradlinige Bewegung des Schlittens in eine kontinuirliche Drehung verwandeln und erhalten eine in der Praxis verwendbare Maschine. Diese unterscheidet sich im Princip nicht von unserm einfachen Schlitten, und alle allgemeinen Gesetze, welche wir oben für diesen gefunden haben, gelten auch für die Maschine. Gewisse Einschränkungen muss man natürlich wegen der gewöhnlichen mechanischen Widerstände und wegen sekundärer elektrischer Wirkungen machen, die bei allen Maschinen vorkommen. Aber im Allgemeinen gelten die oben abgeleiteten Gesetze auch in der Praxis. Betrachten wir z. B. einen Elektromotor mit permanenten Magneten, welcher mit der Geschwindigkeit von 1000 Umdrehungen in der Minute läuft, wenn er keine äussere Arbeit leistet. Derselbe leistet das Maximum an Arbeit, wenn er so belastet ist, dass seine Geschwindigkeit ungefähr 500 Umdrehungen in der Minute beträgt, vorausgesetzt, dass die elektromotorische Kraft dieselbe bleibt. Wenn er immer mehr, z. B. mittelst eines Bremszaumes, belastet wird, so verringert sich die Geschwindigkeit andauernd, bis dass der Anker des Motors still steht. Unter dieser Bedingung ist das Drehungsmoment des Ankers doppelt so gross, als wenn er mit 500 Umdrehungen in der Minute läuft, und der Strom ist zweimal so stark als vorher. Diese Thatsache ist wichtig, da man auf Grund derselben die Zugkraft des Motors beim Angehen berechnen kann, was für die Anwendung der Motoren auf Strassenbahnwagen von grosser Wichtigkeit ist. Man hat nämlich zu beachten, dass ein so starker Strom nie länger als einige Sekunden durch den Anker fliessen darf. Wenn daher bei regelmässigem Betrieb die Motoren im Allgemeinen so belastet sind, dass sie schneller als mit der Hälfte der maximalen Geschwindigkeit laufen, so geschieht dies, theils weil der dieser halben maximalen Geschwindigkeit entsprechende Strom zu gross sein und die Drähte zu sehr erhitzen würde, theils weil man in der Regel nicht mit dem niedrigen Wirkungsgrad von 50% zufrieden ist. Aus der für den Wirkungsgrad oben angegebenen Formel geht hervor, dass der Wirkungsgrad um so mehr der Einheit gleich kommt, je mehr sich die elektromotorische Gegenkraft der elektromotorischen Kraft der Elektricitätsquelle (in unserm Beispiel des galvanischen Elements) nähert. Um aber eine hohe elektromotorische Gegenkraft zu erhalten, muss man den Motor mit grosser Geschwindigkeit laufen lassen.

Wir haben gezeigt, wie ein Schlitten, wenn er auf zwei Metallstäben senkrecht zu den Kraftlinien eines magnetischen Feldes bewegt wird, in dem die beiden Stäbe verbindenden Draht einen Strom erzeugt, und wie ferner ein Strom, welcher von einer äusseren Quelle aus in die Stäbe und den Schlitten fliesst, diesen bewegt und mechanische Arbeit leistet. Es mögen in Fig. 9 AB und CD die Stäbe und ab der Schlitten sein, die den Strom empfangen, und $A'B'$ und $C'D'$ diejenigen, in welchen ein Strom durch die Bewegung des

Schlittens $a'b'$ erzeugt wird. Führen wir also dem letzten Schlitten mechanische Arbeit zu, so können wir bewirken, dass der Schlitten ab mechanische Arbeit leistet, indem er, wie oben beschrieben, ein Gewicht hebt. Wir haben damit den einfachsten Fall der elektrischen Kraftübertragung. Das erzeugende System $A'B'C'D'$ kann beliebig weit von dem empfangenden System $ABCD$ entfernt sein. Es sind nur leitende Verbindungen (Drähte für die Leitung des Stromes) zwischen A' und B und zwischen C' und D nöthig. Es sei F_1 das magnetische Feld des Generators und F das des Motors, P_1 die Kraft, welche auf den Generatorschlitten übertragen wird, und P die Kraft,

Fig. 9.

welche der Motorschlitten abgiebt; es seien ferner v und v_1 die bezüglichen Geschwindigkeiten, l und l_1 die Längen und e und e_1 die elektromotorischen Kräfte; alsdann haben wir offenbar folgende Gleichungen:

$$i = \frac{e_1 - e}{w},$$

$$e_1 = F_1 l_1 v_1, \quad e = F l v,$$

$$P_1 = \frac{F_1 l_1 v_1 - F l v}{w} F_1 l_1,$$

$$P = \frac{F_1 l_1 v_1 - F l v}{w} F l,$$

$$\frac{P_1}{P} = \frac{F_1 l_1}{F l}.$$

Diese Gleichung zeigt, dass die Kraft, welche auf den Generatorschlitten übertragen wird, und die, welche der Motorschlitten abgiebt, in einem bestimmten Verhältnis zu einander stehen. Diese ist von der Geschwindigkeit unabhängig, hängt aber von den Feldstärken F und F_1 und den Längen l und l_1 der Schlitten ab. Die Energie, welche an das Generatorsystem in der Zeiteinheit abgegeben wird, ist

$$A_1 = F_1\, l_1\, v_1 \frac{F_1\, l_1\, v_1 - F\, l\, v}{w},$$

und diejenige, welche das Motorsystem in der Zeiteinheit zurückliefert, ist

$$A = F\, l\, v \frac{F_1\, l_1\, v_1 - F\, l\, v}{w}.$$

Das Verhältnis beider oder der Wirkungsgrad der Uebertragung ist offenbar

$$\eta = \frac{F\, l\, v}{F_1\, l_1\, v_1}.$$

Wenn beide Systeme in Bezug auf die Dimensionen und Feldstärke gleich sind, so ist

$$\eta = \frac{v}{v_1}.$$

Dies würde der Fall sein, wenn man zwei gleiche Dynamomaschinen mit Hauptstromwicklung anwendet, die eine als Generator, die andere als Motor, so dass derselbe Strom die beiden Wicklungen der Feldmagnete durchfliesst. In solchen Fällen war es gebräuchlich, den elektrischen Wirkungsgrad der Kraftübertragung dadurch zu bestimmen, dass man einfach das Verhältnis der gemessenen Geschwindigkeiten bildete. Wenn keine Verluste und keine sekundären Wirkungen in den Verbindungsdrähten und den Maschinen entstehen, so liesse sich kein Einwand gegen diese Methode erheben. Es ist jedoch zu beachten, dass in der Praxis die beiden magnetischen Felder nicht gleich stark sind, obgleich sie von derselben magnetisirenden Kraft hervorgebracht werden. Denn der Magnetismus des Ankers, der durch den in seinen Windungen fliessenden Strom erzeugt wird, ändert in gewisser Weise die Stärke des magnetischen Feldes, und diese Aenderung ist bei einem Motor und einer Dynamomaschine verschieden. Zweitens — und dies ist der schwerwiegendere Einwand — hat ein Stromverlust in den Verbindungsdrähten der Maschinen die Wirkung, den durch die Geschwindigkeiten bestimmten Wirkungsgrad grösser zu machen, als er in Wirklichkeit ist. Es geht dies aus der Gleichung für die elektromotorische Gegenkraft des Motors hervor. Denn da $e = F\, l\, v$ ist, so wächst die Geschwindigkeit v des Motors, wenn F in Folge von Isolationsfehlern in der Leitung und des damit verbundenen Stromverlustes abnimmt. Auf diese Weise kann das Verhältnis der Geschwindigkeiten grösser werden, wenn Isolationsfehler in der Leitung auftreten. Der Wirkungsgrad nimmt dann anscheinend zu, während er in Wirklichkeit kleiner wird.

In den obigen Gleichungen sind v, v_1, P und P_1 veränderlich, während die Dimensionen der Maschinen (oder Schlitten) l und l_1 und die Feldstärken F und F_1 konstant sind.

Da das Verhältnis zwischen den statischen Kräften, P und P_1, eine Konstante ist, so wird die Zahl der Variabeln auf drei verringert, und wenn zwei von ihnen gegeben sind, kann die dritte gefunden werden. Als Beispiel wollen wir den Fall annehmen, dass die Belastung P des Motors (es möge die Kraft sein, welche einen Zug einen Abhang hinaufzieht, wobei wir für den Augenblick von dem Kraftunterschied absehen, der durch die Aenderung der Geschwindigkeit bewirkt wird) und die Geschwindigkeit v_1 des Generators gegeben sind. Wir wollen die Kraft ermitteln, welche nöthig ist, um den Generator zu treiben, ferner die Geschwindigkeit und die Leistung des Motors. Aus der Gleichung für P finden wir sofort die Geschwindigkeit des Motors:

$$v = v_1 \frac{F_1 l_1}{F l} - \frac{w P}{F^2 l^2}.$$

Wie man sieht, ist diese Geschwindigkeit der des Generators nicht direkt proportional, und wenn die letztere wächst, nimmt die Geschwindigkeit des Motors in etwas schnellerem Verhältnis zu. Da das Verhältnis der Geschwindigkeiten in die Formel für den Wirkungsgrad eingeht, ist es offenbar vortheilhaft, die Maschinen mit der grössten Geschwindigkeit laufen zu lassen, die mit der mechanischen Sicherheit verträglich ist. Wenn wir anderseits die Geschwindigkeit des Generators unter eine gewisse Grenze abnehmen lassen, so wird sich der Motor überhaupt nicht bewegen. Dies geschieht, wenn

$$v_1 \frac{F_1 l_1}{F l} = \frac{w P}{F^2 l^2}$$

oder

$$v_1 = \frac{w P}{F l F_1 l_1}.$$

In diesem Fall ist der Wirkungsgrad Null. Das Minimum der Geschwindigkeit des Generators ist daher von den Dimensionen der beiden Maschinen und von der Stärke der beiden Felder abhängig; sie ist dem Produkte dieser vier Grössen umgekehrt proportional.

Die mechanische Energie, welche für den Generator in der Zeiteinheit aufgewendet wird, ist

$$A_1 = P v_1 \frac{F_1 l_1}{F l},$$

und die, welche der Motor in der Zeiteinheit abgiebt,

$$A = P v_1 \frac{F_1 l_1}{F l} - \frac{w P^2}{F^2 l^2}.$$

Die Differenz beider geht verloren. Dieser Verlust, welcher gleich $w \left(\frac{P}{F l}\right)^2$ ist, bildet ein Maass für die Energie, welche in eine für den beabsichtigten Zweck nicht passende Form umgesetzt wird. Da sie nicht als mechanische Energie auftritt, müssen wir sie in Form von Wärme erwarten. Dies ist in der That der Fall, wie man leicht beweisen kann. Wir haben gezeigt, dass das Drehungsmoment gleich dem Produkt aus Stromstärke, Feldstärke und Länge des Leiters ist. Der Quotient $\frac{P}{F l}$ ist daher nichts anderes als die Stärke des Stroms, welcher durch den Schliessungskreis fliesst, und der obige Ausdruck für die verlorene Energie kann auch in der Form

$$w i^2$$

geschrieben werden. Diese stellt, wie bekannt, die Wärme dar, die der Strom von der Stärke i im Schliessungskreis vom Widerstand w in der Zeiteinheit entwickelt.

Auf diese Weise ist die gesammte dem Generator zugeführte Energie in Rechnung gesetzt: theils wird sie vom Motor abgegeben, theils als Wärme im Stromkreis verzehrt. Es braucht kaum erwähnt zu werden, dass sich die für die Kraftübertragung abgeleiteten Formeln auf ideale Maschinen beziehen, die weiter keine mechanischen und elektrischen Verluste besitzen; in der Wirklichkeit treten solche Verluste stets auf, die keineswegs zu vernachlässigen sind und die die Lösung des Problems bedeutend erschweren. Der Verfasser hat es trotzdem für rathsam erachtet, die Kraftübertragung an den idealen Maschinen zu erklären, nicht weil sie die so erhaltenen Formeln unmittelbar auf praktische Fälle anwendbar sind, sondern weil sie die Grundlage für Formeln bilden, die, für die praktischen Zwecke passend abgeändert, in einem spätern Kapitel folgen werden.

Das angeführte Beispiel haben wir auch deshalb gewählt, um zu zeigen, wie leicht und einfach das absolute elektromagnetische Maasssystem auf anscheinend verwickelte Aufgaben angewendet werden kann. Bevor wir den Gegenstand verlassen, müssen wir jedoch noch die Beziehung zwischen den Einheiten des absoluten Systems und den in der Technik gebräuchlichen Einheiten behandeln. Die Einheiten des C.G.S.-Systems passen schlecht für praktische Zwecke. Einige von ihnen sind so klein, dass Millionen und selbst noch grössere Zahlen nöthig sind, um die Grössen auszudrücken, mit denen man in der Technik gewöhnlich zu thun hat, und andere sind wiederum so gross, dass man mit Brüchen rechnen muss. Wir haben schon gelegentlich die drei am häufigsten vorkommenden Einheiten erwähnt, nämlich die der Stromstärke, der elektromotorischen Kraft und des Widerstandes. Die Einheit der Elektricitätsmenge wurde gleichfalls gelegentlich als die Menge elektrischer Masse erklärt, welche ein gegebener Strom in einer Sekunde durch den Leiter führt. Der Vollständigkeit halber erwähnen wir noch eine Eigenschaft der Leiter, nämlich die, eine elektrische Ladung aufzunehmen, welche *Kapacität* genannt wird. Die Kapacität wird durch die Elektricitätsmenge gemessen, mit welcher ein Körper durch die Einheit der elektromotorischen Kraft geladen wird. Die Beziehung zwischen den sogenannten technischen Einheiten und den entsprechenden des C.G.S.-Systems ist folgende:

Stromstärke	Ampère	$= cm^{1/2}\ g^{1/2}\ sek^{-1}$	$\times 10^{-1}$
Elektromotorische Kraft .	Volt	$= cm^{3/2}\ g^{1/2}\ sek^{-2}$	$\times 10^{8}$
Widerstand	Ohm	$= cm\ sek^{-1}$	$\times 10^{9}$
Elektricitätsmenge . . .	Coulomb	$= cm^{1/2}\ g^{1/2}$	$\times 10^{-1}$
Leistung	Watt	$= cm^{2}\ g\ sek^{-3}$	$\times 10^{7}$
Kapacität	Farad	$= cm^{-1}\ sek^{2}$	$\times 10^{-9}$
	Mikrofarad	$= cm^{-1}\ sek^{2}$	$\times 10^{-15}$
Selbstinduktionskoefficient[1])	Henry	$= cm$	$\times 10^{9}$

[1]) Vgl. das 8. Kapitel.

Zweites Kapitel.

Der erste Elektromotor. — Die Forbes'sche Dynamomaschine. — Die ideale Wechselstrommaschine. — Die ideale Gleichstrommaschine. — Der Siemens'sche Doppel-T-Anker. — Selbstinduktion. — Versuche mit Elektromotoren. — Der Hefner-Alteneck'sche Trommelanker. — Der Gramme'sche Ringanker. — Der Pacinotti'sche Ringanker. — Die elektromotorische Kraft des Ankers.

Im vorigen Kapitel haben wir gezeigt, wie mechanische Energie in elektrischen Strom verwandelt wird und wie die elektrische Energie, welche ein von einer gegebenen Potentialdifferenz herrührender Strom repräsentirt, in mechanische Energie zurückverwandelt wird und Nutzarbeit leistet. Den für diese doppelte Umsetzung nothwendigen Apparat wählten wir äusserst einfach, um unsere Untersuchung auf die Grundgesetze zu beschränken und um sie nicht durch die Betrachtung sekundärer Wirkungen und Verluste zu kompliciren. Wir haben jetzt den Gegenstand von einem mehr technischen Standpunkt zu betrachten und zu zeigen, wie die Verwandlnng von mechanischer und elektrischer Energie in einer wirklichen Maschine vor sich geht.

Als ersten Schritt für die praktische Lösung der Aufgabe, Bewegung durch einen elektrischen Strom hervorzubringen, müssen wir das Barlow'sche Rad[1]) betrachten, das vor ungefähr siebzig Jahren von Sturgeon und Barlow erfunden wurde. Ein sternförmiges Rad (Fig. 10) sitzt auf einer horizontalen Achse derart über einem Troge, der mit Quecksilber gefüllt ist, dass bei seiner Drehung immer ein oder zwei Speichen in das Quecksilber eintauchen. Ein permanenter Stahlmagnet NS befindet sich in einer solchen Lage, dass die Kraftlinien, welche seine Pole verbinden,

---

[1]) Barlow, On Magnetic Attraction. London, 1823.

quer durch die Ebene des Kupferrades gehen. Wird in der Pfeilrichtung ein Strom durch das Rad geschickt, so dreht sich dieses, von der Seite des Nordpols betrachtet, im entgegengesetzten Sinne, wie der Uhrzeiger. Man sieht auf den ersten Blick, dass sich dieser Apparat von unserer Schlittenvorrichtung nur dadurch unterscheidet, dass bei ihm die Bewegung eine rotirende ist, und die magnetischen Kraftlinien horizonal durch das Rad verlaufen. Die einzelnen Speichen sind Schlitten, die nach einander als Stromleiter dienen, wenn ihre äusserste Spitze in das Quecksilber des Troges taucht und damit die Verbindung mit dem übrigen Stromkreise herstellt. Man fand, dass das Experiment auch gelingt, wenn statt eines sternförmigen Rades eine volle Metallscheibe verwendet wird, bei welcher der tiefste Punkt des Umfanges in das Quecksilber

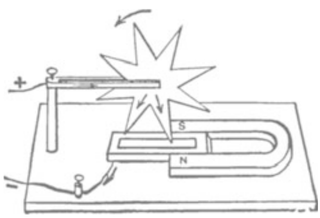


Fig. 10.

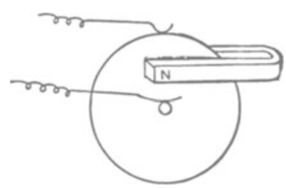


Fig. 11.

taucht. Im Jahre 1831 kehrte Faraday den Versuch um und erhielt einen elektrischen Strom von einer Scheibe, die zwischen den Polen eines Magnets rotirte (Fig. 11). Der Magnet war so aufgestellt, dass seine Kraftlinien durch die Scheibe gingen, und der Strom wurde durch Kontaktfedern an der Achse und an der Stelle des Radumfanges abgenommen, wo die stärkste Induktion stattfindet. Neuerdings hat G. Forbes Dynamomaschinen nach demselben Princip konstruirt: der einzige Unterschied ist nur der, dass er statt des Stahlmagnets einen Elektromagnet verwendet, welcher durch den erzeugten Strom erregt wird.

Die Forbes'sche Maschine[1]) ist deshalb bemerkenswerth, weil sie im Verhältnis zu ihrer geringen Grösse einen sehr kräftigen Strom erzeugt. Forbes hat mehrere Modifikationen angegeben, aber für unsern Zweck genügt es, eine seiner Anordnungen zu beschreiben.

---

[1]) Siehe The Engineer, 17. Juli 1885.

Der Anker dieser Dynamomaschine, welche in Fig. 12 im Längsschnitt dargestellt ist, besteht aus einem Cylinder von Schmiedeeisen ohne jegliche Drahtwicklung. Der Feldmagnet ist ein geschlossenes Eisengehäuse, welches den Anker von allen Seiten umschliesst und zwei kreisförmige Nuthen von trapezförmigem Querschnitt enthält, in welche die Erregerspulen E aus isolirtem Kupferdraht hineingelegt werden. Wenn ein Strom durch diese Spulen geht, erzeugt er Kraftlinien, welche rund um die Wicklung herum verlaufen und theils das eiserne Gehäuse CD, welches die Feldmagnete

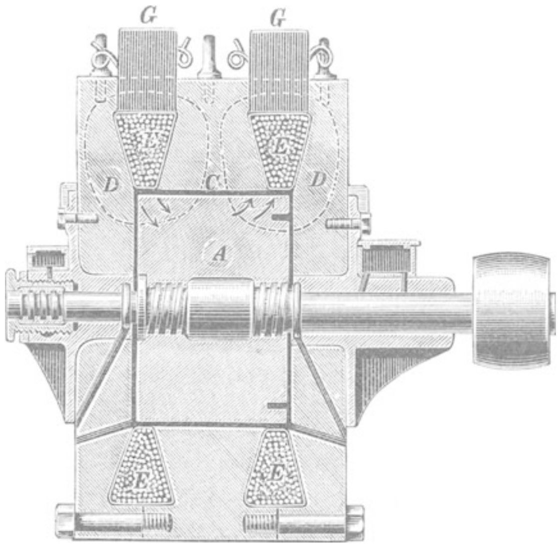


Fig. 12.

bildet, theils den Anker A durchsetzen. Der allgemeine Verlauf dieser Linien wird durch die punktirten Kurven angegeben. Man sieht, dass der cylinderförmige Anker, wenn er rotirt, der Sitz einer elektromotorischen Kraft wird, welche normal zu diesen Linien wirkt, wie durch die Pfeile angedeutet wird. Wenn wir Schleifkontakte an den Enden des Cylinders anbringen, können wir einen von dieser elektromotorischen Kraft herrührenden Strom erhalten. Die Kontakte sind an dem innern Umfang der Erregerspulen angebracht und bestehen aus einer Reihe von Kohlenstücken, welche in zwei Kupferringe gefasst sind. Diese sind mit den Klemmen *GG* verbunden. Der Strom wird so an dem ganzen Umfang des Ankers abgenommen, von dem kein Theil unbenutzt bleibt. Dies ist einer der Gründe, warum die Maschinen im Verhältnis zu ihrer Grösse so kräftig wirken. Der andere Grund liegt darin, dass die Intensität des magnetischen Feldes sehr gross ist. Wir werden in einem der folgenden Kapitel, wo wir die Theorie der Gleichstrommaschinen behandeln, zeigen, dass die Intensität des magnetischen Feldes um so grösser wird, je kleiner der Zwischenraum zwischen der Polfläche des Magnets und dem Kern des Ankers ist. Bei Motoren oder Dynamomaschinen, wo Kupferdraht über den Ankerkern gewickelt wird, ist dieser Zwischenraum nothwendigerweise grösser als bei der Forbes'schen Dynamomaschine, wo der Raum zwischen Anker und Magnet nur gerade noch eine freie Drehung des Ankers gestattet. Die folgenden Zahlen geben eine Vorstellung von der Beziehung zwischen der Grösse dieser Maschinen und der elektrischen Energie, welche sie liefern. Eine Dynamomaschine, welche einen Anker von 15,2 cm Durchmesser und 22,9 cm Länge hat, giebt bei einer Geschwindigkeit von 2000 Umdrehungen in der Minute einen Strom von 5000 A bei einer Spannung von 2 V. Nach Forbes' Angaben würde ein Anker von 1,22 m Durchmesser und 1,22 m Länge bei einer Geschwindigkeit von 1000 Umdrehungen in der Minute 60 V geben. Wenn wir annehmen, dass der Strom in demselben Verhältnis wächst, wie die Oberfläche des cylinderförmigen Ankers, so könnte diese Maschine 320 000 A erzeugen, und es würden ungefähr 30 000 P nöthig sein, um sie zu treiben. Dieser starke Strom würde jedoch mehr Wärme in dem Metall des Ankers erzeugen, als bei gewöhnlicher Temperatur abgegeben werden kann. Die Anwendung einer so hohen Kraft bei der grossen Geschwindigkeit von 1000 Umdrehungen kommt folglich nicht in Frage, aber aus rein theoretischen Gründen ist es interessant zu sehen, wie bald unser einfacher Versuch mit dem Schlitten durch passende Abänderung zu Resultaten führt, welche wegen ihrer Grösse ganz über das Verwendungsgebiet der modernen Technik hinausreichen. Dynamomaschinen, welche der beschriebenen ähnlich sind, werden allgemein *unipolare* genannt. Forbes zieht die Benennung *nonpolare* Dynamomaschinen vor, und mit gutem Recht. Denn, wie wir schon in dem ersten Kapitel gezeigt haben, ist ein Magnet mit nur einem Pol eine physikalische Unmöglichkeit.

Alle Dynamomaschinen dieser Art haben den Nachtheil, dass sie im Verhältnis zu der elektromotorischen Kraft, welche sie erzeugen, eine sehr hohe Geschwindigkeit erfordern. Der Grund hierfür liegt darin, dass die Länge des Theiles des Leiters, welcher das Feld schneidet, durch die Grösse des Ankers begrenzt ist. Man kann alle diese Maschinen als Dynamomaschinen auffassen, deren Ankerkern nur eine Drahtwindung besitzt. Eine ideale Maschine dieser Art ist in Fig. 13 abgebildet. Die Feldmagnete NS stehen einander horizontal gegenüber. Ihre Pole besitzen cylinderförmige Flächen, zwischen denen eine einzige Drahtwindung mittelst einer Kurbel bewegt werden kann. Das eine Ende des Drahtes ist mit der Achse AA verbunden, das andere mit einer metallnen, von der Achse isolirten Hülse M, und an beiden schleifen Kontaktfedern,

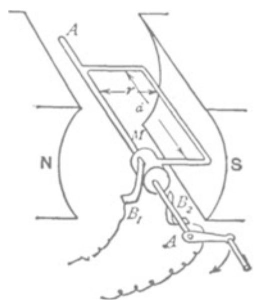


Fig. 13.

welche den Strom abnehmen. Die Kraftlinien verlaufen horizontal durch den Zwischenraum der Magnetpole von N nach S, und diejenigen, welche innerhalb des von dem Drahte bestrichenen Raumes liegen, werden zweimal bei jeder Umdrehung geschnitten. In dem Falle, wo die Kurbel horizontal, also parallel zu den Kraftlinien steht, ist die Geschwindigkeit des Drahtes senkrecht zur Richtung der Kraftlinien und deshalb auch seine elektromotorische Kraft ein Maximum. Wenn die Kurbel sich einem ihrer todten Punkte, also der vertikalen Lage nähert, nimmt die Geschwindigkeit in der betrachteten Richtung und die elektromotorische Kraft des Schlittens ab und wird Null in dem Augenblick, wo die Bewegung umgekehrt wird. Aus dem vorigen Kapitel geht hervor, dass die Richtung, in welcher die elektromotorische Kraft wirkt, von der Richtung der Bewegung abhängt. Der hervorgebrachte Strom muss deshalb ein

Wechselstrom sein. Wenn wir die Winkel der Kurbel von irgend einer Lage aus zählen, z. B. von ihrer vertikalen Stellung aus, und dieselben als Abscissen, die elektromotorischen Kräfte als Ordinaten auftragen, so erhalten wir eine graphische Darstellung für die Beziehung zwischen diesen beiden Grössen. In einem gleichförmigen Felde, wo die elektromotorische Kraft nur von der Geschwindigkeit des Schlittens in der Richtung senkrecht zu den Kraftlinien abhängt, aber nicht von seiner Lage in dem Felde, ist die elektromotorische Kraft offenbar dem Sinus des Kurbelwinkels proportional und wird durch die Gleichung

$$E = F l \omega \sin \alpha$$

dargestellt, wo ω die Geschwindigkeit des Drahtes, α den Kurbelwinkel, l die Länge des Leiters und F die Feldstärke bedeutet. Man sieht, dass $E = 0$, für $\alpha = 0$ und $\alpha = 180^0$ ist, während E für $\alpha = 90^0$ oder $\alpha = -90^0$ seinen grössten numerischen Werth erreicht, der je nach dem Vorzeichen von α entweder positiv oder negativ ist. Dreht man die Kurbel in der durch den Pfeil angegebenen Richtung, so verlässt der Strom die Maschine an der Kontaktfeder B_1, wenn die Kurbel rechts von der senkrechten Mittellinie sich befindet; er fliesst von B_2 durch den äussern Kreis und tritt bei B_1 in die Maschine ein, wenn die Kurbel sich links von der vertikalen Mittellinie befindet. Es sei n die Anzahl der Umdrehungen in der Minute, also $\frac{n}{60} 2 \pi r = \omega$ die Geschwindigkeit des Drahtes; alsdann ist das Maximum der elektromotorischen Kraft, abgesehen vom Vorzeichen, durch folgende Formel gegeben:

$$E = F l \frac{n}{60} 2 \pi r.$$

Nun ist $2 r l$ die Fläche, welche durch Projektion sämmtlicher Lagen des Drahtes auf eine zu den Kraftlinien senkrechte Ebene erhalten wird, und $2 r l F$ die Zahl der Kraftlinien, welche durch diese Fläche hindurchgehen; setzen wir $2 r l F = z$, so finden wir für das Maximum der elektromotorischen Kraft den Ausdruck:

$$E = \pi z \frac{n}{60}. \qquad \qquad (1)$$

Während einer halben Umdrehung wächst die elektromotorische Kraft von Null bis zu ihrem Maximum und nimmt alsdann wieder bis Null ab.

Bei den praktischen Anwendungen der Dynamomaschine kommt es aber nicht auf das Maximum der elektromotorischen Kraft an, sondern auf die *mittlere elektromotorische Kraft*, welche in derselben Zeit, während der die veränderliche elektromotorische Kraft wirkt, dieselbe Strommenge in dem Schliessungskreise hervorbringt. Es möge der Draht in einem bestimmten Zeitmoment eine Lage einnehmen, welche durch den Winkel α bestimmt ist, den wir von der Vertikalen an zählen, und er möge sich während der Zeit Δt um den Winkel $\Delta \alpha$ vorwärts bewegen: alsdann ist die Elektricitätsmenge, welche durch den gesammten Kreis vom Widerstande W fliesst, offenbar

$$\Delta q = \frac{F l \omega \sin \alpha \,.\, \Delta t}{W},$$

und da

$$\omega = r \frac{\Delta \alpha}{\Delta t},$$

so ist

$$\Delta q = \frac{F l r}{W} \sin \alpha \,.\, \Delta \alpha.$$

Während einer halben Umdrehung wächst α von 0 bis π, und der obige Ausdruck, integrirt zwischen diesen Grenzen, giebt

$$q = 2 \frac{F l r}{W}.$$

Die Zeit, während welcher diese Elektricitätsmenge q fliesst, ist $t = \frac{\pi r}{\omega}$. Hätte während derselben Zeit eine konstante elektromotorische Kraft E_1 gewirkt, so würde die erzeugte Elektricitätsmenge gleich $\frac{E_1}{W} \frac{\pi r}{\omega}$ sein. Soll E_1 die gesuchte mittlere elektromotorische Kraft sein, so muss

$$\frac{E_1}{W} \frac{\pi r}{\omega} = q,$$

mithin

$$E_1 = \frac{2}{\pi} F l \omega$$

sein. $F l \omega$ ist diejenige elektromotorische Kraft, welche in dem Augenblick herrscht, wo der Draht die Kraftlinien rechtwinklig schneidet, d. h. die maximale, wir haben also auch

$$E_1 = \frac{2}{\pi} E.$$

Es ist jedoch zu bemerken, dass sich der mittlere Werth der elektromotorischen Kraft, wie wir ihn hier definiren, auf die gesammte Elektricitätsmenge bezieht, welche man mittelst des Apparates durch einen gegebenen Widerstand schicken kann, aber nicht auf die dabei erzeugte Nutzarbeit und Wärme. Setzen wir für E seinen Werth aus Gleichung (1), so erhalten wir für die mittlere elektromotorische Kraft

$$E_1 = 2\,z\,\frac{n}{60}, \quad \ldots \ldots \ldots \quad (2)$$

wo z, wie vorher, die gesammte Anzahl der Kraftlinien bedeutet, welche durch die vom Draht beschriebene Fläche gehen, während $\frac{n}{60}$ die Anzahl der Umdrehungen in der Sekunde ist.

Bei der idealen Wechselstrommaschine, welche Fig. 13 darstellt, ist der Draht, in welchem der Strom erzeugt wird, nur auf einer Seite der Achse angebracht. Wir können die Anordnung leicht verbessern, wenn wir den Draht symmetrisch auf der andern Seite ergänzen, aber die beiden Seiten von der Achse isoliren und das Ende der zweiten Hälfte an einer zweiten Metallhülse befestigen, die von M isolirt ist. Die Kontaktfeder oder Bürste B_2 müsste alsdann so angebracht werden, dass sie diese zweite Hülse berührte, und da die elektromotorischen Kräfte, welche in jedem Moment in den beiden Drähten entstehen, dieselbe Richtung in Bezug auf den äussern Stromkreis haben — von einem festen Punkt im Raum betrachtet, sind sie entgegengesetzt gerichtet —, so liefert diese verbesserte Dynamomaschine mit zwei Drähten die doppelte elektromotorische Kraft, wie die ursprüngliche Anordnung. Wir können ferner die elektromotorische Kraft noch weiter vergrössern, indem wir den Draht in mehreren Windungen um die Achse herum anbringen und eine rechteckige Spule bilden, deren einzelne Windungen von einander isolirt sind. Wenn die Anzahl der Drähte, gezählt auf beiden Seiten der Achse, gleich $\nu\,\sigma$ ist, so ist die mittlere elektromotorische Kraft

$$E_1 = 2\,z\,\frac{n}{60}\,\nu\,\sigma.$$

Wollten wir statt des Wechselstroms Gleichstrom hervorbringen, so brauchen wir an unserer Dynamomaschine nur eine Vorrichtung anzubringen, durch welche die Ströme so gerichtet werden, dass sie den äussern Stromkreis im gleichen Sinne durchfliessen. Eine solche Vorrichtung ist der *Kommutator;* seine Wirkung kann mit Hülfe von Fig. 14 leicht erklärt werden. In der gezeichneten Stellung ist die im Draht *a b* hervorgerufene elektromotorische Kraft nach dem Beschauer hin gerichtet und die des Drahtes *c d* vom Beschauer weg gerichtet. Die Enden dieser Drähte sind hinten durch das Querstück *a c* verbunden und vorn durch zwei Drähte *d f* und *b g* mit den beiden Hälften eines Metallcylinders, welcher der Isolirung wegen auf einer hölzernen Nabe sitzt. Die in *c d* und *a b* entstehenden elektromotorischen Kräfte rufen einen Strom hervor, welcher in der Pfeilrichtung von der Bürste B_1 durch *f d*, *c a* und *b g* zu der Bürste B_2 verläuft und von da durch den äussern Schliessungskreis nach B_1 zurückkehrt. Dies dauert so lange, bis die Kurbel die niedrigste

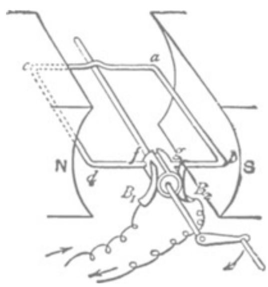


Fig. 14.

vertikale Stellung erreicht und der Strom bis Null abgenommen hat. Wenn die Kurbel vertikal steht, so berühren beide Bürsten gleichzeitig beide Hälften des Metallcylinders oder Kommutators, wie er genannt wird, und einen Augenblick später werden die Verbindungen umgekehrt: die Bürste B_2 berührt nun die Cylinderhälfte, mit welcher der Draht *f* verbunden ist, und die Bürste B_1 die Cylinderhälfte, an welcher der Draht *g* anliegt. Aber gleichzeitig ist die Richtung der elektromotorischen Kraft in beiden Drähten umgekehrt worden, da der Draht *c d* in die rechte Seite des Feldes und *a b* in die linke eintritt. In Folge dessen fliesst der Strom im äussern Schliessungskreis in derselben Richtung, wie vorher, indem er von Null bis zu einem Maximum anwächst, bis die Kurbel links horizontal steht, und wieder bis Null abnimmt, wenn die Kurbel vertikal steht. Fig. 15

stellt den Verlauf der Stromstärke graphisch dar: die Abscissen sind die aufeinanderfolgenden Winkelstellungen der Kurbel, und die Ordinaten sind den Sinus dieser Winkel proportional. Man muss bemerken, dass das Umkehren der Stromrichtung immer dann stattfindet, wenn die elektromotorische Kraft Null ist. In Folge dessen findet der Kontaktwechsel der Bürsten ohne Funkenbildung statt. Um die Leistung der Maschine weiter zu vergrössern, kann man, wie oben, das eine Drahtrechteck durch eine Spule mit vielen Windungen (Fig. 16) ersetzen.

Bisher haben wir stillschweigend angenommen, dass der Raum innerhalb der Drahtspulen, welche den Anker bilden, Luft oder andere unmagnetische Stoffe enthält. Die Kraftlinien, welche zwischen den Polflächen NS verlaufen, müssen also ihren Weg durch einen bedeutenden Luftzwischenraum nehmen. Da Eisen dem Durchgang der Kraftlinien einen etwa 800mal kleinern Widerstand entgegensetzt,

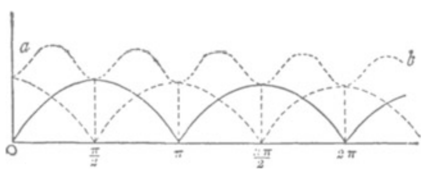


Fig. 15.

so würden wir, wenn die Ankerspulen auf Eisen gewickelt werden, den Kraftlinien den Weg erleichtern und die Stärke des magnetischen Feldes vergrössern und damit weiter eine starke Zunahme der elektromotorischen Kraft und der Stromstärke erzielen. Eine der ersten Dynamomaschinen, welche nach diesem Princip konstruirt wurde, ist die Siemens'sche vom Jahre 1855, die mit dem sogenannten Doppel-T-Anker versehen ist. Der Ankerkern besteht hier aus einem Eisencylinder mit zwei tiefen Längsnuthen, die so einander gegenüberliegen, dass ihr Querschnitt einem Doppel-T gleicht. Die Wicklung wird in diese Nuthen gelegt, und ihre beiden Enden werden mit den Flächen eines zweitheiligen Kommutators verbunden. Fig. 17 zeigt einen Querschnitt dieses Ankers. Bei den ersten Maschinen bestand der Kern aus einem einzigen Stück, aber man fand, dass er alsdann durch innere Ströme bedeutend erwärmt wurde. Ein massiver Metallkörper wird bekanntlich stets heiss, wenn er sich schnell zwischen Magnetpolen dreht. Der Grund für diese Erscheinung liegt darin, dass das Metall, wenn es Kraftlinien schneidet, selbst der Sitz einer elektromotorischen Kraft wird, die rechtwinklig zu der Bewegungsrichtung und den Kraftlinien wirkt. Kräftige Ströme verlaufen alsdann parallel zu der Achse, und zwar aufwärts auf der einen und abwärts auf der andern Seite derselben. In einem massiven Ankerkern haben diese Ströme nur den Widerstand des Metalls zu überwinden, und dieser ist wegen des grossen Querschnitts äusserst gering. Die Ströme sind deshalb sehr stark und absorbiren nicht allein viel Kraft, sondern schwächen auch den durch die Induktion in dem Kupferdraht hervorgerufenen Strom. Um dies zu vermeiden, muss man die Masse des Kerns rechtwinklig zur Achse zerschneiden und die Stücke möglichst gut von einander isoliren. Dies kann entweder dadurch geschehen, dass man tiefe Einschnitte in den Kern macht, oder dass man ihn aus dünnen Scheiben zusammensetzt, welche von einander durch Papierscheiben und irgend

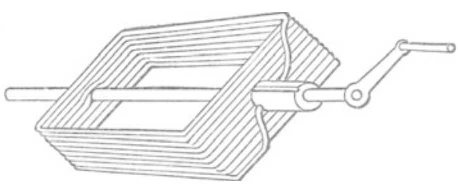


Fig. 16.

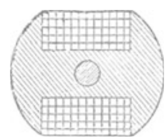


Fig. 17.

eine andere isolirende Masse getrennt sind. Die Doppel-T-Anker werden jedoch heute nicht mehr viel bei Dynamomaschinen verwendet, da sie durch vollkommenere Formen ersetzt sind, die wir sogleich beschreiben werden. Bei kleinen Elektromotoren benutzt man sie jedoch jetzt noch.

Fig. 15 ist noch für den Gebrauch derartiger Maschinen mit Doppel-T-Anker als Motoren wichtig. Sie zeigt, dass die elektromotorische Gegenkraft eines solchen Ankers eine veränderliche Grösse ist, welche von der Winkelstellung des Ankers abhängt. Wenn die Köpfe des Doppel-T-Ankers den Polen der Feldmagnete gegenüberstehen, so liegt die Spule rechtwinklig zu den Kraftlinien, und die elektromotorische Gegenkraft ist Null. Dies geschieht genau in dem Momente, wenn die Bürsten gleichzeitig beide Platten des Kommutators berühren und die Spulen deshalb kurz geschlossen sind. Ein Strom, welcher durch den Motor geht, während er in dieser Lage still steht, kann ihn nicht antreiben, und man sagt deshalb, der Anker hat zwei todte Punkte. Ist der Motor im Gange, so reicht gewöhnlich das Trägheitsmoment des Ankers hin, um ihn über die todten Punkte hinwegzuführen, und von der Unbequemlichkeit abgesehen, dass man den Motor gelegentlich mit der Hand antreiben muss, bilden die todten Punkte kein Hindernis in mechanischer Hinsicht. Sie sind aber aus folgendem Grunde in elektrischer Beziehung sehr nachtheilig. Die Stärke des Stromes, der in einem gegebenen Momente durch den Motor geht, hängt theils von dem elektrischen Widerstand des Motors ab, theils von der elektromotorischen Gegenkraft. Da aber bei den todten Punkten keine elektromotorische Gegenkraft vorhanden ist, so ist die Stromstärke ein Maximum, während gleichzeitig die erzeugte mechanische Energie Null ist. Wir nehmen hierbei an, dass der Motor von einer konstanten elektromotorischen Kraft gespeist wird, wie es gewöhnlich in der Praxis der Fall ist. Wir haben nun zwei Fälle zu unterscheiden: die Feldmagnete des Motors können eine Hauptstrom- oder eine Nebenschlusswicklung haben. Im ersten Falle hat der Strom, welcher durch den Motor fliesst, nur den Widerstand der Spulen der Feldmagnete zu überwinden, wenn der Anker an einem todten Punkte angelangt ist. Wenn dagegen der Anker in der Stellung sich befindet, wo die elektromotorische Gegenkraft ein Maximum ist, so hat der Strom die Summe der Widerstände von Feldmagnet- und Ankerspulen zu überwinden. In dieser Stellung ist die mechanische Energie des Ankers am grössten, aber die Stromstärke am geringsten. Wir finden deshalb, dass auf der einen Seite die Stärke der Feldmagnete, welche von dem Strome abhängt, gerade in dem Moment am kleinsten ist, wo der Anker die grösste Kraft ausüben muss, und dass auf der andern Seite das magnetische Feld am stärksten ist, wenn der Anker sich in den todten Punkten befindet und keine Kraft ausüben kann. Aus dem Vorhergehenden würden wir schliessen, dass zweimal während jeder Umdrehung ein grosser Stromverlust stattfindet, nämlich dann, wenn die Bürsten momentan durch den Kommutator kurzgeschlossen sind. Obgleich die Dauer dieses Kurzschlusses nur geringe Zeit währt, so ist sie doch bei der Geschwindigkeit der elektrischen Erscheinungen im Stande, eine grosse Wirkung auf die Leistungsfähigkeit des Motors auszuüben.

Ein Umstand mildert jedoch wesentlich die soeben beschriebene nachtheilige Wirkung der todten Punkte: es ist dies die Eigenschaft der elektrischen Ströme, welche man als *Selbstinduktion* bezeichnet. Sie kann am besten als eine Art von Trägheit aufgefasst werden, welche sich einem plötzlichen Wechsel der Stromstärke widersetzt. Wenn ein Stromkreis eine Drahtspule enthält, die Eisen umschliesst (wie im vorliegenden Fall die Wicklung der Feldmagnete), so ist die Selbstinduktion so gross, dass eine merkbare Zeit verfliesst, bis die Stromstärke sich ändert. Die Zunahme der Stromstärke an den todten Punkten wird daher durch die Erscheinung der Selbstinduktion verzögert, und anstatt dass die Stromstärke plötzliche und heftige Aenderungen erleidet, wird sie einfach wellenförmig.

Anders liegt es, wenn der Motor eine Nebenschlusswicklung hat und von einer konstanten elektromotorischen Kraft gespeist wird. Da die Feldmagnete unabhängig von dem Strom erregt werden, welcher durch den Anker geht, kann die Selbstinduktion den Strom nicht konstant machen; es treten also an den todten Punkten plötzlich Aenderungen der Stromstärke und grosse Verluste an elektrischer Energie ein. Man sollte deshalb die Motoren mit Doppel-T-Anker nie anders gebrauchen, als wenn Anker und Feldmagnete hintereinander geschaltet sind. Ist es durchaus nöthig, einen Motor dieser Art zu verwenden, dessen Feldmagnete entweder permanente Stahlmagnete oder besonders erregte Elektromagnete sind, so kann der Energieverlust bis zu einem gewissen Grade dadurch verhütet werden, dass man in den Stromkreis des Ankers einen Elektromagnet einschaltet, welcher durch seine Selbstinduktion den Strom konstanter macht (*Drosselspule*).

Da diese Eigenschaft des Doppel-T-Ankers von praktischer Wichtigkeit ist, hat der Verfasser es für nothwendig gehalten, die obige Theorie experimentell zu bestätigen. Ein doppeltes Ziel war dabei zu erreichen. Es handelte sich darum, zu beweisen, dass erstens bei einem Hauptstrommotor kein merkbarer Stromverlust an den todten Punkten stattfindet, und dass zweitens bei einem Motor, dessen Feldmagnete besonders erregt werden, ein solcher Verlust auftritt. Die Experimente wurden folgendermassen ausgeführt: Zwei kleine Griscom'sche Motoren wurden in einem Stromkreis hintereinander geschaltet und ihre Achsen so gekuppelt, dass die Anker im rechten Winkel zu einander standen, d. h. wenn ein Anker an seinem todten Punkte war, befand sich der andere in der Stellung der grössten Wirkung, und seine elektromotorische Gegenkraft war ein Maximum. Diese Anordnung ist in Fig. 15 durch die punktirte Kure dargestellt, welche gegen die ausgezogene um 90^0 verschoben ist. Die resultirende elektromotorische Gegenkraft ist in jedem Punkte gleich der Summe der Ordinaten der beiden Kurven; sie wird durch die Wellenlinie *a b* dargestellt. Man sieht, dass diese Kurve nirgends die Abscissenachse berührt und dass deshalb die gesammte elektromotorische Gegenkraft der beiden hintereinander geschalteten Motoren niemals Null ist. Ein bedeutender Stromabfall kann deshalb an den todten Punkten beider Anker nicht auftreten. Die Motoren wurden mit einem Strom gespeist, dessen elektromotorische Kraft während des Versuches möglichst konstant gehalten wurde, während die erzeugte mechanische Energie an einem Kapp'schen Dynamometer gemessen wurde. Der Wirkungsgrad der beiden gekuppelten Motoren ist in Tabelle I angegeben. Die Motoren wurden darauf parallel geschaltet und ihr Wirkungsgrad unter denselben Bedingungen bestimmt. In diesem Falle gab es bei jeder Umdrehung vier todte Punkte, bei welchen die elektromotorische Gegenkraft Null war und ein grosser Stromabfall eintreten konnte, wenn die Selbstinduktion der Magnetspulen dies nicht verhütete. Wie man erwarten musste, war der Strom, welcher durch beide Motoren ging, ungefähr doppelt so gross, und ihre elektromotorische Gegenkraft war nur halb so gross wie früher. Der Wirkungsgrad war jedoch derselbe (Tabelle II). Es wurde alsdann ein einziger Motor für sich untersucht: sein Wirkungsgrad war ungefähr derselbe wie derjenige der beiden vereinigten Motoren (Tabelle III). Die Feldmagnete beider Motoren wurden darauf besonders für sich erregt, und die Anker rechtwinklig zu einander gekuppelt und hintereinander geschaltet, also nach Fig. 15: der Wirkungsgrad stellte sich nun viel höher als bei den frühern Versuchen heraus (Tabelle IV). Dies kommt nur daher, weil die Energie, welche zur Erregung der Feldmagnete nothwendig ist, bei der Berechnung des Wirkungsgrades nicht berücksichtigt ist. Es wurden darauf die beiden Anker parallel gekuppelt und die Feldmagnete wieder für sich erregt; es gab mithin bei jeder Umdrehung vier Punkte, wo die elektromotorische Gegenkraft Null wurde und ein Energieverlust stattfand, wie offenbar aus dem geringen Wirkungsgrad in Tabelle V hervorgeht. Ein Motor wurde alsdann allein unter denselben Bedingungen untersucht, und es ergab sich dasselbe Resultat (Tabelle VI). Diese Versuche beweisen ohne Zweifel, dass unsere obige Schlussfolgerung betreffs der Wirkungen der todten Punkte richtig ist.

Untersuchung von zwei Griscom'schen Motoren.

		I.	II.
Widerstand in Ohm	des Ankers	0,328	0,352
	der Feldmagnete	0,596	0,522
	insgesammt	0,924	0,874

Tabelle I.

Anker rechtwinklig gekuppelt, beide Feldmagnete und Anker hintereinander geschaltet.

Tourenzahl in der Minute	Stromstärke	E. M. K.	kgm am Zaum	Wirkungsgrad %
2140	1,31	6,90	0	0
2368	3,85	18,20	80,4	19,0
2440	3,50	16,00	73,1	21,7

Tabelle II.

Anker rechtwinklig gekuppelt. Jeder Anker mit seinem Feldmagnet hintereinander geschaltet. Beide Motoren parallel geschaltet.

Tourenzahl in der Minute	Stromstärke	E. M. K.	kgm am Zaum	Wirkungsgrad %
2120	2,35	2,94	0	0
2480	5,25	6,05	28,2	14,7
2775	6,60	7,57	59,1	19,5
2340	6,80	7,52	50,0	16,3
2060	7,50	7,63	61,5	18,0
2884	7,90	9,27	102,3	23,0
2328	7,60	8,50	79,0	21,0

Tabelle III.

Nur ein Motor. Anker und Feldmagnete hintereinander geschaltet.

Tourenzahl in der Minute	Stromstärke	E.M.K.	kgm am Zaum	Wirkungsgrad %
1980	1,02	4,00	0	0
2024	4,15	8,20	41,5	28,0
1772	4,15	8,40	36,3	17,0
2334	4,22	9,25	52,1	22,3
1954	3,82	8,10	33,7	18,0
2241	3,70	8,25	38,8	20,9
2118	3,50	7,60	32,8	20,5
2070	5,37	12,00	72,7	18,6

Tabelle IV.

Anker rechtwinklig gekuppelt und hintereinander geschaltet. Feldmagnete besonders erregt.

Tourenzahl in der Minute	Stromstärke	E.M.K.	kgm am Zaum	Wirkungsgrad %
1536	1,42	7,20	0	0
2030	3,30	11,10	50,6	22,8
1632	3,10	9,50	41,0	23,2
2190	3,70	12,90	66,1	22,7
2264	3,93	13,40	68,5	21,4

Tabelle V.

Anker rechtwinklig gekuppelt und parallel geschaltet. Feldmagnete besonders erregt.

Tourenzahl in der Minute	Stromstärke	E.M.K.	kgm am Zaum	Wirkungsgrad %
2000	3,90	4,40	0	0
3040	4,50	5,20	0	0
1094	7,50	5,50	33,1	13,3
1746	8,50	6,60	52,7	15,6
1680	9,10	7,50	54,2	13,1

Tabelle VI.

Nur ein Motor. Feldmagnete für sich erregt.

Tourenzahl in der Minute	Stromstärke	E.M.K.	kgm am Zaum	Wirkungsgrad %
1778	1,65	3,80	0	0
2330	4,80	5,60	11,9	7,4
2422	4,75	5,80	17,2	10,3

Wie wir schon bemerkten, haben die Motoren mit gewöhnlichem Doppel-T-Anker den Nachtheil, dass man sie mit der Hand antreiben muss, wenn sie zufällig an einem todten Punkte zum Still-

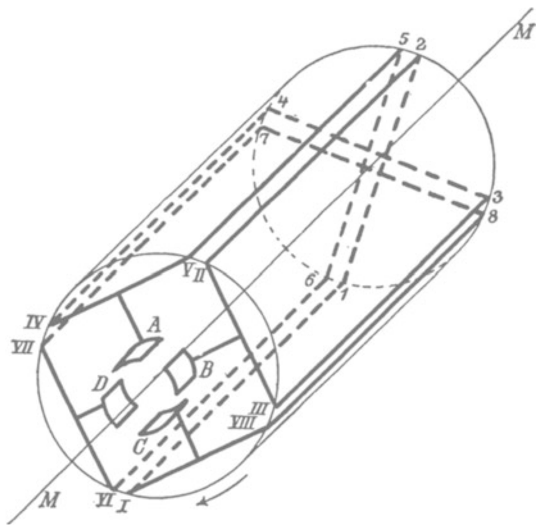


Fig. 18.

stand kommen. Sie werden deshalb nur in kleinen Grössen gebaut; für grössere Motoren nimmt man Anker ohne todte Punkte. Einen solchen Anker kann man aus einem einfachen Doppel-T-Muster ableiten, wenn man zwei Spulen anwendet, welche rechtwinklig zu einander stehen. Diese Anordnung ist in Fig. 18 abgebildet, welche die von Hefner-Alteneck im Jahre 1872 erfundene *Trommel-*

wicklung darstellt. Der Einfachheit halber ist die Achse fortgelassen und der Kern nur angedeutet. Links vom Anker möge der Nordpol, rechts der Südpol des Feldmagnets liegen. Es soll die negative oder linke Bürste das Segment D, und die positive oder rechte Bürste das Segment B berühren. Der Strom tritt in den Anker an der negativen Bürste ein und theilt sich in die beiden folgenden Zweige: der eine geht durch VII, 7, 8, VIII, I, 1, 2, II nach dem positiven Segment B, der andere durch VI, 6, 5, V, IV, 4, 3, III nach demselben Segment B. Die beiden Stromkreise sind also parallel geschaltet. Wenn der Anker sich soweit gedreht hat, dass das Segment C mit der negativen Bürste in Berührung kommt, berührt diese für kurze Zeit die beiden Segmente B und C, während die positive Bürste gleichzeitig A und B berührt. In dieser Lage sind die Drähte I, VI und V, II im stärksten Theil des Feldes, und die Drähte VII, IV und III, VIII liefern keinen Beitrag für die elektromotorische Kraft. Der Stromkreis zerfällt alsdann in die beiden folgenden Zweige: von D durch VI, 6, 5, V nach A und von C durch I, 1, 2, II nach B. In diesem Falle rührt die ganze elektromotorische Kraft von den beiden Drähten her, welche sich im stärksten Theil des Feldes befinden, während sie in allen andern Lagen von vier Drähten hervorgerufen wird.

Wir haben oben gezeigt, dass die mittlere elektromotorische Kraft eines Drahtkreises von der Form I, 1, 2, II, welche aus zwei äussern Drähten besteht ($\nu\,\sigma = 2$), gleich

$$E_1 = 2 \cdot 2\, z \frac{n}{60}$$

ist. Da zwei solche Kreise hintereinander verbunden sind, finden wir für die elektromotorische Kraft des ganzen Ankers

$$E_a = 8\, z \frac{n}{60}.$$

Nun ist aber die Anzahl der Drähte, rund um den Anker gezählt, gleich 8, und wenn wir statt eines viertheiligen Kommutators einen sechstheiligen anwenden und den Kern mit drei Doppelspulen bewickeln, so haben wir drei Spulen hintereinander, und der Ausdruck für E_a wäre

$$E_a = 12\, z \frac{n}{60},$$

da, rund um den Anker gezählt, zwölf äussere Drähte vorhanden sind. Wir können auf diese Weise Anker mit jeder beliebigen Zahl äusserer Drähte konstruiren. Es sei $\nu\,\sigma$ diese Zahl; alsdann ist die elektromotorische Kraft einer Dynamomaschine oder die elektromotorische Gegenkraft, welche in ihrem Anker entsteht, wenn sie als Motor läuft, gleich

$$E_a = \nu\,\sigma\,z\,\frac{n}{60} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (3)$$

Der Einfachheit halber haben wir in Fig. 18 nur einen Draht für jede Spule gezeichnet. Es ist jedoch klar, dass die elektromotorische Kraft in demselben Verhältnis wächst, in dem man die Drahtwindungen jeder Spule vermehrt. Dieser Fall ist in Formel (3)

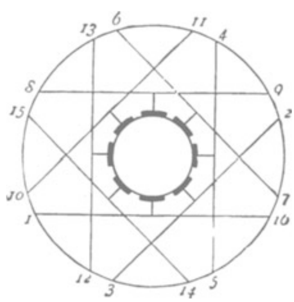


Fig. 19.

schon vorgesehen, wo σ die Anzahl der Spulen bezeichnet und ν die Anzahl der äussern Drähte jeder Spule, das Produkt $\nu\,\sigma$ also gleich der gesammten Anzahl der wirksamen Drähte des Ankers ist. Ein Hefner-Alteneck'scher Anker mit einem achttheiligen Kommutator ist in Fig. 19 gezeichnet. Wenn wir die vordern Enden der Ankerdrähte mit römischen Zahlen bezeichnen, die hintern Enden mit arabischen Ziffern, so verläuft der Strom folgendermassen:

von der negativen Bürste nach	I, 1, 2, II, III, 3, 4, IV, V, 5, 6, VI, VII, 7, 8, VIII, XVI, 16, 15, XV, XIV, 14, 13, XIII, XII, 12, 11, XI, X, 10, 9, IX	nach der positiven Bürste.

Je grösser die Zahl der Kommutatortheile ist, um so konstanter ist die elektromotorische Kraft und die Stromstärke.

Diese Art der Ankerwicklung hat ferner den grossen Vortheil, dass fast die ganze Länge des Drahtes zur Erzeugung der elektromotorischen Kraft ausgenutzt wird, denn mit Ausnahme der Querverbindungen an den Enden wirkt der ganze Draht. Dagegen hat die Wicklung den Nachtheil, dass sie sich sehr schwer repariren lässt. Wenn nämlich ein Isolationsfehler in einer der Spulen auftritt, so

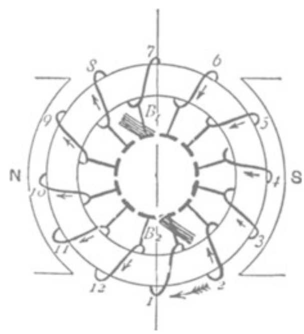


Fig. 20.

muss man meistens einen grossen Theil des Drahts abwickeln, um an die schadhafte Stelle zu gelangen, da die Spulen, besonders an den Enden, in vielen Lagen übereinander liegen.

In dieser Beziehung ist der Gramme'sche oder Pacinotti'sche Anker vorzuziehen. Hier ist ein kreisförmiger Eisenring, Fig. 20,

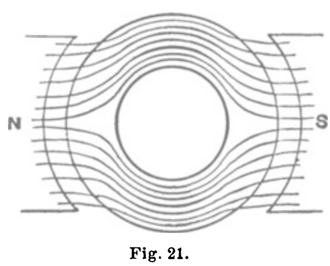


Fig. 21.

in einer fortlaufenden Schraubenlinie mit isolirtem Kupferdraht bewickelt, und gewisse Punkte desselben sind durch radial verlaufende Drähte mit den Kommutatorsegmenten verbunden. Zwei Bürsten, B_1 und B_2, vermitteln die Verbindung zwischen dem äussern Stromkreis und dem Ankerdraht. Die Wirkung des Gramme'schen Ankers lässt sich am besten mit Hülfe von Fig. 21 erklären, wo die Kraftlinien gezeichnet sind. Wenn sich kein Anker zwischen den Polen der Feldmagnete befindet, so können wir annehmen, dass der grösste Theil der Kraftlinien geradlinig von einem Pol zum andern verläuft

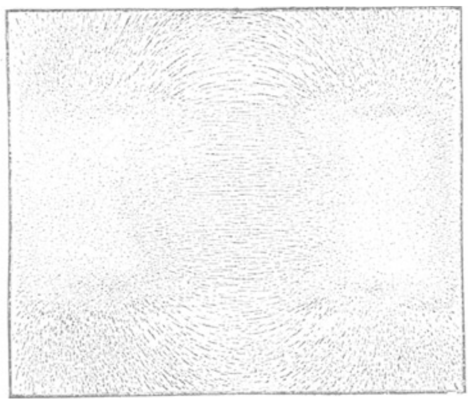


Fig. 22.

(Fig. 22). Bringt man aber einen ringförmigen Kern zwischen die Pole, so wird der Verlauf der Kraftlinien so geändert, dass jede Linie den Weg des geringsten Widerstandes wählt; sie wird also so

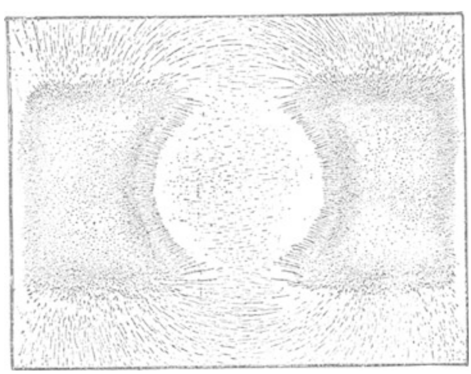


Fig. 23.

lange wie möglich im Eisen verlaufen und nur an dem äussern Umfang des Kerns durch die Luft gehen, weil sie nur hier in den Polschuh eintreten kann (Fig. 23). Es ist kein Grund vorhanden, dass die Kraftlinien den Ankerkern an dem innern Umfange verlassen, und der Raum in der Mitte des Ringes bleibt daher fast frei von ihnen. Weil jedoch parallele Kraftlinien eine abstossende Wirkung auf einander ausüben, so können in dem Fall, wo der Kern dünn und die Dichte der Kraftlinien gross ist, einige in dem Hohlraume des Cylinders verlaufen. Bei gut konstruirten Maschinen ist die Zahl derer, welche durch die Mitte gehen, aber so klein, dass man sie vernachlässigen kann.

Die Thatsache, dass das Innere des Cylinders von Kraftlinien frei bleibt oder, wie wir auch sagen können, durch den Eisenkern vor dem Einfluss der Magnetpole geschützt wird, ist von grosser Wichtigkeit, weil in Folge dessen auf die innern Drähte der Wicklung keine inducirende Wirkung ausgeübt wird. Wenn dies der Fall wäre, so würden in diesen Drähten elektromotorische Kräfte hervorgerufen, welche die Leistung der Maschine schwächen würden, da sie den in den äussern Drähten entstehenden elektromotorischen Kräften entgegengesetzt sind. Auf Grund der ausführlichen Auseinandersetzungen über die ideale Gleichstrommaschine (Fig. 14) lässt sich die Richtung der elektromotorischen Kraft, welche in den äussern Drähten des Gramme'schen Ringes (Fig. 20) entsteht, leicht angeben. Wenn er sich wie der Zeiger einer Uhr dreht, wird die elektromotorische Kraft in allen Drähten, welche rechts von der vertikalen Mittellinie liegen, nach dem Beschauer hin gerichtet, in den Drähten auf der andern Seite vom Beschauer weg gerichtet sein. Die beiden Ströme, welche hierdurch entstehen, sind durch Pfeile angedeutet. In den Drähten 1 und 7 entsteht keine elektromotorische Kraft, so lange sie sich parallel zu der Richtung der Kraftlinien bewegen, während die elektromotorische Kraft in 4 und 10, welche die Kraftlinien rechtwinklig schneiden, ein Maximum ist. Weil die Wicklung des Ankers aus einem Stück besteht, addiren sich die elektromorischen Kräfte in den Drähten 2, 3, 4, 5 und 6, ebenso die in 12, 11, 10, 9 und 8, und beide Stromkreise sind fortwährend parallel geschaltet. Der Strom tritt bei der Bürste B_2 (der negativen) in den Anker, theilt sich dann in die beiden erwähnten Zweige, vereinigt sich wieder bei der Bürste B_1 (der positiven), verlässt hier den Anker und geht wieder in den äussern Kreis. Man sieht aus der Figur, dass jede Bürste, wenn sie zwei auf einander folgende Segmente des Kommutators berührt, eine metallische Verbindung zwischen dem Anfang und Ende der betreffenden Spule herstellt, diese also kurz schliesst. Wenn die Bürsten an der gezeichneten Stelle — am neutralen Durchmesser des Kommutators — aufliegen, so schadet dieser Kurzschluss nichts, weil keine elektromotorische Kraft in der Spule vorhanden ist; aber brächten wir die Bürsten in einen aktiven Theil des Feldes, entweder rechts oder links von der neutralen Linie, so würde jede Spule, wenn ihre Enden die Bürsten passirten, von einem starken Strome durchflossen, der heftige Funken an den Bürsten hervorriefe und wahrscheinlich den Anker zerstörte. Die beste Stellung für die Bürsten wird immer durch den Versuch gefunden; sie fällt nicht vollständig mit der geometrischen neutralen Linie zusammen, sondern liegt bei den Dynamomaschinen etwas vor, bei den Motoren etwas hinter ihr. Die Meinungen über den Grund dieser Erscheinung sind getheilt. Eine Zeit lang schob man sie auf die Verzögerung, die bei der Magnetisirung und Entmagnetisirung des eisernen Kerns stattfinden sollte, aber diese Theorie ist schon längst von den meisten Elektrikern verworfen. Einige glauben, dass die Verschiebung der neutralen Linie von dem magnetisirenden Einfluss herrührt, den der Ankerstrom auf den Eisenkern ausübt; hierdurch wird der Kern in einen doppelten Hufeisenmagnet verwandelt, dessen gleiche Pole an einander liegen und dessen Achse fast rechtwinklig auf derjenigen der Feldmagnete steht. Andere behaupten wiederum, dass die Bürsten wegen des Einflusses der Selbstinduktion in den Ankerspulen bei einer Dynamomaschine nach vorwärts und bei einem Motor nach rückwärts verschoben werden müssen. In Wirklichkeit beeinflussen die zuletzt genannten Ursachen gleichzeitig die Stellung der Bürsten, wie wir im vierten Kapitel eingehender auseinandersetzen werden.

Der erste Elektromotor, dessen Anker nach dem obigen Princip gewickelt war, wurde von Pacinotti in Pisa konstruirt und von ihm in der Zeitschrift „Il Nuovo Cimento" im Jahre 1864 beschrieben. Dieser Motor ist in Fig. 24 skizzirt; der Kern des Ankers unterscheidet sich nur dadurch von dem sieben Jahre später von Gramme angewandten, dass er nach aussen hin Vorsprünge zwischen den Spulen hat, welche die magnetische Anziehung zwischen Anker und Polschuhen bedeutend verstärken. Fig. 25 zeigt einen Theil des Ankers und der Wicklung. Der Kern der Gramme'schen Maschine besteht aus Eisendraht, der in Form eines Ringes von länglichem Querschnitt aufgewickelt ist. Nachdem der Ring der Isolation wegen mit Band umwunden ist, wird der mit Baumwolle umsponnene Kupferdraht in einer Anzahl von Spulen, welche den Kern innen und aussen vollständig bedecken, quer darüber gewickelt; der Anfang jeder Spule und das Ende der benachbarten sind mit demselben Kommutatorsegment verbunden. Darauf wird

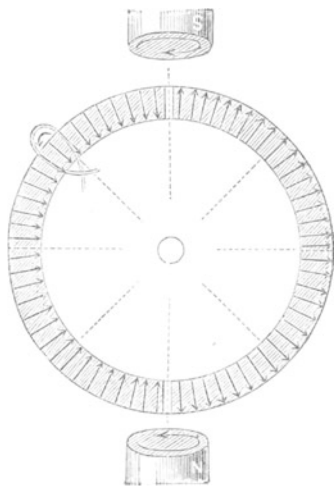


Fig. 24.

der Anker auf ein hölzernes Mittelstück aufgepasst, mittelst dessen er auf der Drehungsachse befestigt ist.

Mit Hülfe der Grundformeln, welche im vorigen Kapitel abgeleitet sind, kann man die elektromotorische Kraft des Gramme'schen Ankers bestimmen. Es sei D sein Durchmesser, b seine

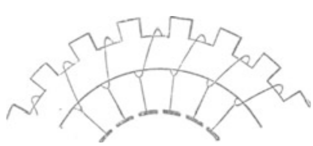


Fig. 25.

Länge und a die radiale Tiefe des Kerns, ν sei die Zahl der Drahtwindungen, welche auf ein Kommutatorsegment kommt, und σ die Anzahl der Segmente, mithin $\nu\sigma$ die Gesammtzahl der Drähte auf dem äussern Umfange des Ankers. Wenn n die Zahl der Umdrehungen in der Minute bezeichnet und z die gesammte Zahl der

Kraftlinien, welche von einem Pol ausgehen und in eine Hälfte des Ankerumfanges eintreten, so ist die mittlere elektromotorische Kraft, die in jedem Draht entsteht, nach Gleichung (2)

$$E_1 = 2\, z \frac{n}{60}.$$

Da $\frac{1}{2}\nu\sigma$ Drähte zeitweilig hintereinander geschaltet sind, so ist die mittlere elektromotorische Kraft des Ankers

$$E_a = z\, \nu\, \sigma \frac{n}{60}. \quad \text{. . . . .} \quad (4)$$

Man kann einwenden, dass dieser Ausdruck, der auf Gleichung (2) beruht, nur dann gilt, wenn die Bedingung, unter der er abgeleitet wurde, bei der Dynamomaschine erfüllt ist. Diese Bedingung bestand darin, dass das Feld in dem vom Anker eingenommenen Raume vollständig gleichförmig ist. In Wirklichkeit ist das niemals der Fall, und die genaue Vertheilung ist nicht genau bekannt. Man könnte deshalb daran zweifeln, ob Gleichung (4) streng richtig ist in dem Falle, wo die Feldstärke nicht gleichförmig, sondern in verschiedenen Theilen des Feldes verschieden ist. Es ist daher wünschenswerth, die Formel für die elektromotorische Kraft unter der Voraussetzung abzuleiten, dass die Feldstärke in einem beliebigen Punkte des Ankerumfangs eine Funktion des Winkels α ist, welchen der Radius dieses Punktes mit der neutralen Linie bildet. Wie diese Funktion beschaffen ist, vermögen wir nicht zu sagen; es ist auch nicht nothwendig, dass wir sie definiren können. Wir machen nur die einzige Annahme, dass sich die Feldstärke nicht plötzlich, sondern stetig von Punkt zu Punkt ändert. Wir nehmen ferner an, dass die Anzahl der Drähte auf dem Anker gross und mithin ihr Winkelabstand $\Delta\alpha$ sehr klein ist, und zwar so klein, dass die Feldstärke innerhalb dieses Winkelraums als konstant angesehen werden kann. Da die elektromotorische Kraft, welche in den Drähten entsteht, ihrer Geschwindigkeit proportional ist, so genügt es, sie für eine bestimmte Geschwindigkeit zu bestimmen; will man sie für eine andere Geschwindigkeit berechnen, so kann man sie dadurch erhalten, dass man den vorher gefundenen Werth mit dem Verhältnis der beiden Geschwindigkeiten multiplicirt. Im vorliegenden Falle nehmen wir als eine passende Geschwindigkeit diejenige an, die jeden Draht am Ende einer Sekunde in die Lage führt, welche zu

Beginn derselben Sekunden von dem nächsten Nachbardraht eingenommen wurde, also

$$v = \Delta\alpha \frac{D}{2}.$$

Es ist dies eine sehr geringe Geschwindigkeit. Wenn wir wissen wollen, welches die elektromotorische Kraft bei der grössern Geschwindigkeit von n Umdrehungen in einer Minute ist, so haben wir die elektromotorische Kraft bei der geringern Geschwindigkeit mit dem Verhältnis von $\frac{n}{60} \pi D/v$ zu multipliciren. Da $\nu\sigma\Delta\alpha = 2\pi$, so ist $v = \frac{\pi D}{\nu\sigma}$, und das Verhältnis der beiden Geschwindigkeiten ist

$$\frac{\frac{n}{60}\pi D}{\frac{\pi D}{\nu\sigma}} = \nu\sigma\frac{n}{60}.$$

Es sei auf der einen Hälfte des Ankerumfangs $F_1, F_2 \ldots F_{\frac{\nu\sigma}{2}}$ die Feldstärke an dem ersten, zweiten, ... $\frac{\nu\sigma}{2}$ten Draht, welche wir von der neutralen Linie aus zählen, alsdann ist die elektromotorische Kraft in diesen Drähten

$$\begin{aligned} E_1 &= F_1\, b\, v \\ E_2 &= F_2\, b\, v \\ &\ldots\ldots \\ E_{\frac{\nu\sigma}{2}} &= F_{\frac{\nu\sigma}{2}}\, b\, v. \end{aligned}$$

Die Summe aller dieser Kräfte giebt die gesammte elektromotorische Kraft des Ankers, welche wir im Folgenden mit E_a bezeichnen:

$$E_a = \Sigma F b v.$$

Der Ausdruck $F_1 b v$ stellt aber die Anzahl der Kraftlinien dar, welche zwischen dem ersten und zweiten Draht in dem Anker verlaufen, da F_1 ihre Dichte und $b v$ der Flächenraum ist, der von dem ersten Draht in einer Sekunde beschrieben wird. In ähnlicher Weise stellt $F_2 b v$ die Zahl der Kraftlinien zwischen dem zweiten und dritten Draht dar u. s. w., und die Summe aller dieser Ausdrücke bedeutet die gesammte Anzahl der Kraftlinien, welche zwischen dem ersten und letzten Draht auf der Hälfte des Ankerumfangs eintreten. Es möge z diese gesammte Anzahl bezeichnen; alsdann ist die elektromotorische Kraft bei der geringen Geschwindigkeit v

$$E_a = z.$$

Bei der Geschwindigkeit von n Umdrehungen in der Miuute haben wir deshalb

$$E_a = z \, \nu \, \sigma \frac{n}{60}, \quad \ldots \ldots \ldots \quad (4)$$

also genau denselben Ausdruck, welchen wir oben erhielten. Wenn z in absolutem Maass ausgedrückt wird, so wird E_a auch in absolutem Maass erhalten. Will man es in Volt ausdrücken, so muss man die rechte Seite der Gleichung mit 10^{-8} multipliciren. Wir können alsdann schreiben

$$E_a = z \, \nu \, \sigma \frac{n}{60} 10^{-8} \text{ Volt} \quad \ldots \ldots \quad (5)$$

Ist der Querschnitt des Ankerkerns gleich $2\,a\,b$ und bezeichnen wir die mittlere Dichte der Kraftlinien des Ankerkerns (für das Quadratcentimeter) mit m, so haben wir

$$z = 2\,a\,b\,m,$$

und setzen wir diesen Werth in Gleichung (5) ein, so finden wir für die elektromotorische Kraft

$$E_a = 2\,a\,b\,m\,\nu\,\sigma \frac{n}{60} 10^{-8} \text{ Volt.} \quad \ldots \ldots \quad (6)$$

Dieser Ausdruck ist oft bequemer als der erste, weil man an ihm sofort sehen kann, wie die Dimensionen des Ankers auf die elektromotorische Kraft einwirken. Die Dichte der Kraftlinien m im Anker kann eine gewisse Grenze nicht überschreiten, weil alsdann der Kern mit Magnetismus gesättigt ist. Diese Grenze entspricht etwa dem Werthe $m = 27000$; in der Praxis wird jedoch gewöhnlich eine geringere Dichte angenommen aus Gründen, die im folgenden Kapitel auseinandergesetzt werden. Bei neuern Dynamomaschinen und Motoren wählt man gewöhnlich $m = 18000$. Man kann jedoch den Querschnitt des Ankerkerns nicht ohne weiteres aus seiner Länge und Tiefe berechnen. Denn um Energieverlust und Erwärmung zu vermeiden, wird, wie oben erwähnt, der Ankerkern der Dynamomaschinen und Motoren in Theile zerlegt, welche von einander isolirt sind; die Trennungsebenen sind der Richtung der Kraftlinien im Ankerkern und derjenigen der Bewegung parallel. Der Raum, welcher durch diese Isolirung verloren geht, muss daher von dem gesammten Querschnitt des Kerns abgezogen werden, und der Rest — 70 bis 90% des Ganzen — enthält allein Kraftlinien.

Die elektrische Energie, welche im Anker entwickelt wird, wenn ein Strom i durch seine Spulen fliesst, ist $E_a\, i$, und die Anzahl der Pferdestärken, welche diese Leistung repräsentirt, ist

$$A = \frac{2}{736}\, i\, a\, b\, m\, \nu\, \sigma \frac{n}{60}\, 10^{-8}.$$

Die Energie, welche zugeführt wird, muss natürlich etwas grösser sein, um die mechanischen Widerstände, wie Reibung in den Achsenlagern und Luftwiderstand, ferner den magnetischen Widerstand, welcher von unvollständiger Theilung des Kerns herrührt, und die Rückwirkung des Ankers auf die Magnete zu überwinden. Bei guten Dynamomaschinen steigen diese Verluste nicht über 10% und können selbst noch geringer sein.

Drittes Kapitel.

Umkehrung der Dynamomaschinen. — Unterschied zwischen Dynamomaschinen und Motoren. — Theorie der Motoren. — Leistung der Motoren. — Verluste, welche von mechanischer und magnetischer Reibung herrühren. — Wirkungsgrad der Umsetzung. — Elektrischer Wirkungsgrad. — Formeln für Dynamomaschinen und Motoren.

Nach den vorhergehenden Ausführungen ist es klar, dass die Dynamomaschine und der Motor umgekehrte Begriffe sind. Jede Dynamomaschine kann in der Praxis als Motor benutzt werden, und in den meisten Fällen kann ein Motor dazu dienen, einen Strom zu erzeugen. Aus rein theoretischen Gründen betrachtet, sollte dies in allen Fällen möglich sein; aber man findet, dass die Geschwindigkeit, welche erforderlich ist, um kleine Motoren als selbsterregende Dynamomaschinen zu verwenden, oft so hoch ist, dass man sie in der Praxis nicht anwenden kann. Der Grund hierfür liegt darin, dass die Polflächen bei kleinen Motoren nur eine sehr beschränkte Ausdehnung haben; in Folge dessen ist der magnetische Widerstand für den Weg, welchen die Kraftlinien zu durchlaufen haben, ausserordentlich hoch, und es ist für die Erregung der Feldmagnete eine grössere elektrische Energie erforderlich, als der Anker bei einer mässigen Geschwindigkeit erzeugen kann. Dieser Punkt wird später noch näher betrachtet werden. Für unsern vorliegenden Zweck genügt es zu bemerken, dass vom theoretischen Standpunkte aus betrachtet dieselbe Maschine sowohl als Motor wie als Dynamomaschine verwendet werden kann. Eine besondere Untersuchung der Theorie der Motoren könnte daher überflüssig erscheinen. Nun hat aber die Erfahrung gezeigt, dass die beste Dynamomaschine nicht immer den besten Motor abgiebt, und dass sich gewisse Einzelheiten je nach dem Zweck ändern, für den die Maschine bestimmt ist. Die Bedingungen, welchen die Dynamomaschinen im

Allgemeinen Genüge zu leisten haben, sind also von denen der Motoren verschieden. Die Dynamomaschinen müssen einen hohen Wirkungsgrad haben, sie müssen ununterbrochen im Betriebe sein können, ohne dass sie grössere Erwärmung erleiden oder durch ausnahmsweise hohe Stromstärken beschädigt werden; sie müssen trotz grössern Aenderungen in der Stromabgabe gleichmässig arbeiten. Ihr Gewicht ist in der Regel von sekundärer Bedeutung; in den meisten Fällen wird gegen ein grosses Gewicht der Maschine kein Einwand erhoben. Die Motoren sollen dagegen im Allgemeinen von möglichst geringem Gewicht sein; sie arbeiten in Pausen, und ein hoher Wirkungsgrad ist wohl erwünscht, spielt aber keine so grosse Rolle, besonders nicht bei kleinen Motoren. Bei den ersten elektrischen Kraftübertragungen wurde der Unterschied zwischen den

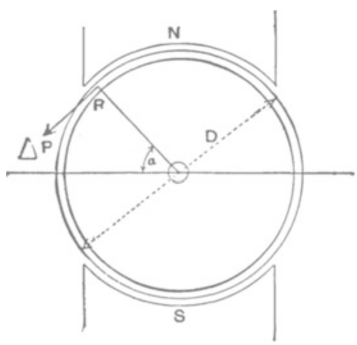


Fig. 26.

Dynamomaschinen und Motoren übersehen, und man stellte gewöhnlich zwei ganz gleiche Maschinen auf, von denen die eine als Generator, die andere als Motor wirkte. Heute würde man auf diese Weise nicht mehr allen Anforderungen gerecht werden, man baut Motoren nach besondern Grundsätzen. Deshalb ist es nothwendig geworden, die Theorie der Motoren und der Dynamomaschinen getrennt zu behandeln.

Es seien in Fig. 26 NS die Polschuhe und D der mittlere Durchmesser eines ringförmigen Raumes, welcher von den äussern Drähten eines Ring- oder Trommelankers eingeschlossen wird. Es sei l die Länge des Drahts und F die Feldstärke in einem gegebenen Punkte R, dessen Radius mit der neutralen Linie den Winkel α bildet. Alle Drähte auf der obern Hälfte des Ankers werden von gleichgerichteten Strömen durchflossen, die vom Beschauer wegfliessen mögen; in allen Drähten der untern Hälfte fliesst der Strom nach dem Beschauer hin. Es sei i die Stromstärke in jedem einzelnen Draht, und $\nu\sigma$ die gesammte Zahl der äussern Drähte rings um den Anker. Wenn diese eng aneinander liegen und nur soviel Zwischenraum freilassen, als für die gegenseitige Isolirung nothwendig ist, so ist die Wirkung des Stromes i, welcher der Reihe nach die $\frac{\nu\sigma}{2}$ Drähte auf der einen Hälfte des Umfangs durchströmt, offenbar dieselbe wie die einer halbkreisförmigen *Stromschicht* von der Gesammtstärke $\frac{\nu\sigma}{2}i$, deren Breite normal zur Stromrichtung gemessen gleich $\frac{\pi D}{2}$ ist. Die Stromdichte der Schicht, d. h. die Stromstärke in der Einheit der Breite ist $\frac{\nu\sigma}{2}i \Big/ \frac{\pi D}{2} = \frac{\nu\sigma i}{\pi D}$; der Strom, welcher bei R in einem elementaren Streifen von der sehr kleinen Bogenbreite $\Delta\alpha$ fliesst, ist

$$\Delta i = \frac{\nu\sigma i}{\pi D} \frac{D}{2} \Delta\alpha.$$

Die mechanische Kraft, welche diesen elementaren Streifen in der Pfeilrichtung zu drehen sucht, ist

$$\Delta P = F l \Delta i$$

oder

$$\Delta P = F l \frac{D}{2} \frac{\nu\sigma i}{\pi D} \Delta\alpha.$$

Nun giebt F, die Feldstärke, multiplicirt mit $l \frac{D}{2} \Delta\alpha$, der Fläche des elementaren Streifens, die Anzahl von Kraftlinien, welche in den Anker durch diese Fläche eintreten. Es möge Δz jene Zahl bezeichnen, wir können alsdann schreiben

$$\Delta P = \frac{\nu\sigma i}{\pi D} \Delta z.$$

Wir betrachten nun einen zweiten elementaren Streifen der Stromschicht, welcher an den ersten stösst. Die von dem Streifen ausgeübte Kraft wird durch einen ähnlichen Ausdruck dargestellt, aber hierin kann der Werth von Δz ein anderer sein. Dies ist der Fall, wenn die Feldstärke nicht gleichförmig ist, sondern sich in irgend einer Weise mit dem Winkel α ändert. Für unsern Zweck ist es nicht nothwendig zu wissen, in welcher Weise sich die Feldstärke F an den verschiedenen Punkten ändert; wie auch immer das Gesetz dieser Veränderung beschaffen sein mag, die Summe aller Werthe von Δz muss immer dasselbe geben: sie muss gleich der gesammten Anzahl der Kraftlinien sein, welche in den Ankerkern eintreten. Die mechanische Kraft, welche von der obern halbkreisförmigen Stromschicht ausgeübt wird, oder, was auf dasselbe hinauskommt, von der obern Hälfte $\frac{\nu\sigma}{2}$ der Ankerwicklung, ist daher

$$z \frac{\nu \sigma i}{\pi D},$$

wo z die gesammte Anzahl der Kraftlinien bezeichnet. Gleichzeitig übt die untere Hälfte des Ankers dieselbe Kraft aus, und für die ganze Kraft, die den Anker zu drehen sucht und die an einem Hebelarm wirkt, der gleich dem Radius $\frac{D}{2}$ der Wicklung ist, erhalten wir

$$P = \frac{2 z \nu \sigma i}{\pi D}.$$

Für das Drehungsmoment finden wir $T = P \frac{D}{2}$ oder

$$T = \frac{z \nu \sigma i}{\pi} \quad \ldots \ldots \ldots \ldots \quad (7)$$

Wenn wir die gesammte Anzahl der Kraftlinien durch das Produkt ihrer Dichte im Ankerkern und der Dimensionen des letztern ausdrücken, so können wir das Drehungsmoment auch in folgender Form schreiben

$$T = \frac{2 a b m \nu \sigma i}{\pi} \quad \ldots \ldots \ldots \ldots \quad (8)$$

Wir haben schon erwähnt, dass m über eine bestimmte Grenze hinaus nicht mehr wächst, wie gross auch immer die erregende Kraft sein mag, welche auf die Magnete wirkt. Nehmen wir an, dass die Feldmagnete bei zwei Motoren von verschiedener Grösse so erregt werden, dass dieselbe Dichte der Kraftlinien in beiden Ankerkernen hervorgerufen wird, und nehmen wir ferner an, dass beide Anker mit demselben Draht bewickelt sind, so wird die Anzahl der Windungen bei der grössern Maschine grösser sein als bei der kleinern: die beiden werden sich wie die Quadrate der linearen Dimensionen verhalten. Da die Querschnitte der Anker in demselben

Verhältnis stehen, so folgt, dass sich die Drehungsmomente wie die vierten Potenzen der linearen Dimensionen verhalten. Wenn also der grössere Motor die doppelten linearen Dimensionen des kleinern hat, so ist das Drehungsmoment sechzehnmal so gross.

Man sieht aus Formel (7), dass das Drehungsmoment eines Motors nur von der Feld- und Stromstärke abhängt, aber nicht von der Geschwindigkeit. Dies lässt sich experimentell in folgender Weise zeigen. Zwei Hauptstromdynamomaschinen sind durch ein Paar Drähte verbunden: die eine wirkt als Generator, die andere, die als Motor dient, wird mit einem Prony'schen Zaum versehen, mit dem die erzeugte Energie gemessen werden kann. Welche Geschwindigkeit der Motor auch immer haben mag, der Zaum zeigt das Drehungsmoment an der Achse des Motors an, wenn sein Hebel frei schwebt. Dasselbe ist gleich dem Produkt aus der Länge des Hebelarms und dem angehängten Gewicht. Wenn nun die Geschwindigkeit des Generators und mit ihr die elektromotorische Kraft geändert wird, so erfährt auch die Geschwindigkeit des Motors eine dementsprechende Veränderung, aber der Strom und die Belastung am Zaum bleiben konstant. In „Lumière électrique“ vom 3. Oktober 1885, wo Marcel Deprez diesen Gegenstand behandelt, heisst es: „Wenn ein Strom durch einen Motor geht, welcher einen Pacinotti'schen Anker besitzt, so ist dessen Drehungsmoment von dem Zustand der Bewegung oder Ruhe unabhängig, und bei der Bewegung ist er unabhängig von der Geschwindigkeit, vorausgesetzt, dass die Stromstärke konstant gehalten wird. Umgekehrt, wenn das statische Moment, welches der Bewegung des Ankers zu widerstehen sucht, konstant gehalten wird, so bleibt der Strom von selbst konstant, welche Mittel man auch anwendet, um ihn zu ändern. Der Versuch muss in folgender Weise angestellt werden: Man befestigt auf der Drehungsachse des Motors ein sich selbst regulirendes Dynamometer, dessen Belastung konstant bleibt, welche Aenderung auch immer die Reibung des Zaums oder die Geschwindigkeit des Motors erfährt; es bleibt mithin der tangentiale Widerstand, welcher der Drehung entgegenwirkt, stets konstant. Man speist den Motor mit dem Strom einer Elektricitätsquelle (einer Batterie oder einer Dynamomaschine) und beobachtet die Stromstärke und die elektromotorische Kraft. Wenn letztere allmählich von Null an zunimmt, so bemerken wir, dass die Stromstärke in demselben Verhältnis wächst, so lange der Motor stillsteht, aber sobald sie einen gewissen Werth erreicht hat und der

Motor anfängt sich zu drehen, wächst der Strom nicht weiter, wenn auch die Zunahme der elektromotorischen Kraft fortdauert, und in Folge davon auch die Geschwindigkeit des Motors ansteigt. Bei einem Versuch, welcher vor drei Jahren angestellt wurde, diente als Elektricitätsquelle eine Gramme'sche Dynamomaschine und als Motor eine Hefner-Alteneck'sche Maschine; der Zaum war mit 2,5 kg an einem Hebelarm von 16 cm belastet. Als der Motor zu rotiren anfing, zeigte die Nadel des Strommessers auf den 26. Theilstrich. Ich vergrösserte alsdann die Geschwindigkeit der Dynamomaschine, bis der Motor 32 Umdrehungen in der Sekunde machte; der Strommesser zeigte alsdann nur auf den 27. Theilstrich statt auf den 26."

Motor	Umdrehungen in der Minute	Stromstärke	$\frac{\text{E.M.K.}}{\text{Geschwindigkeit}}$
mit Hefner-Alteneck'scher Trommel	425	13,53	0,0267
	783	12,68	0262
	1165	13,65	0278
	1660	13,00	0250
mit Gramme'schem Ringe	270	8,16	06496
	526	8,16	06437
	608	8.23	06768
	742	8,40	06792
	944	8,23	06713
	1004	8,23	06803
	1160	8,23	06704
	1460	8,23	06736
mit Hefner-Alteneck'scher Trommel	356	5,60	0132
	618	5,78	0139
	1016	5,42	0127
	1236	5,60	0130
	1470	5,95	0129
	1636	5,60	0127
	1662	5,42	0,0127
für hohe Spannungen	200	5,60	1,659
	384	6,30	1,692
	470	6,12	1,775
	606	5,95	1,633
	710	5,95	1,662

Da die Leistung bei konstanter Belastung des Zaums der Geschwindigkeit proportional und die dem Motor zugeführte elektrische Energie das Produkt aus Stromstärke und elektromotorischer Kraft ist, so folgt, dass die Geschwindigkeit der elektromotorischen Kraft proportional sein muss, wenn die Stromstärke konstant ist. Die vorstehende Tabelle, welche der Abhandlung von Marcel Deprez entnommen ist, zeigt, dass dies in der That der Fall ist. Man sieht, dass das Verhältnis von elektromotorischer Kraft und Geschwindigkeit bei allen vier Motoren, die untersucht wurden, für alle Geschwindigkeiten fast konstant bleibt, und dass die Stromstärke also auch konstant ist.

Wenn wir auf Gleichung (7) zurückgehen, so ist die mechanische Energie, die durch eine Umdrehung der Motorachse geleistet wird, offenbar gleich $2\pi T$, und wenn der Motor mit einer Geschwindigkeit von n Umdrehungen in der Minute oder mit $\frac{n}{60}$ Umdrehungen in der Sekunde läuft, so ist die während dieser Zeit entwickelte Energie

$$A = 2 z \nu \sigma i \frac{n}{60} \quad \ldots \ldots \ldots \quad (9)$$

Nun geht durch jede Hälfte des Ankers der Strom i; $2i$ ist folglich der gesammte Strom, welcher an der einen Bürste in den Anker ein- und an der andern heraustritt. Wir schreiben J_a (Ankerstrom) für $2i$ und haben alsdann

$$A = z \nu \sigma \frac{n}{60} J_a \quad \ldots \ldots \ldots \quad (10)$$

Aus Gleichung (4) geht aber hervor, dass die elektromotorische Gegenkraft des Ankers durch die Formel

$$E_a = z \nu \sigma \frac{n}{60} \quad \ldots \ldots \ldots \quad (4)$$

gegeben ist; verbindet man beide Gleichungen, so folgt:

$$A = E_a J_a \quad \ldots \ldots \ldots \quad (11)$$

Die mechanische Energie ist gleich dem Produkt aus Stromstärke und elektromotorischer Kraft, d. h. gleich der elektrischen Energie. Dies ist nach dem Princip von der Erhaltung der Kraft natürlich, und wenn wir von den Gleichungen (4) und (11) ausgehen würden, so könnten wir daraus die Werthe für A und T ableiten. Aber es ist doch zweckmässiger, diese Grössen für sich zu bestimmen, um nachher zu sehen, dass die Schlussfolgerungen mit dem Princip der Erhaltung der Kraft im Einklang stehen.

Alle obigen Gleichungen sind auf das absolute Maasssystem bezogen. Für praktische Zwecke ist die Anwendung dieser Einheiten jedoch nicht bequem, und statt Dynen und Erg zu gebrauchen, ziehen wir es vor, nach Kilogramm und Pferdestärken zu rechnen. Es ist daher nothwendig, die Beziehung zwischen den absoluten und den technischen Einheiten aufzustellen.

Nach der Definition, welche wir im ersten Kapitel von der Dyne gegeben haben, ist sie gleich der Kraft, welche der Masse von einem Gramm in einer Sekunde die Beschleunigung von einem Centimeter ertheilt. Es würde nicht ganz genau sein, zu sagen, die Dyne ist gleich einem gewissen Bruchtheil des Kilogramm, weil das Gewicht der Masseneinheit an verschiedenen Orten der Erdoberfläche verschieden ist. Aber für alle Orte gelten folgende Gleichungen:

$$P = m p ,$$

$$G = m g ,$$

wo P die Kraft ist, die der Beschleunigung p entspricht, G das Gewicht des Körpers, gemessen durch die Beschleunigung der Schwere g und m die Masse des Körpers, so dass

$$P = G \frac{p}{g} .$$

Wenn g in Meter (9,81) für die Sekunde gegeben ist und das Gewicht in Kilogramm, so ist die Einheit der Kraft:

$$1 \text{ Dyne} = \frac{10^{-3}\, 10^{-2}}{g} \text{ kg}^*$$

oder

$$1 \text{ Dyne} = \frac{10^{-5}}{g} \text{ kg}^*.$$

Drücken wir also das technische Maass für die Kraft, das Kilogramm, in absoluten Einheiten aus, so erhalten wir

$$1 \text{ kg}^* = 981000 \text{ Dynen}.$$

Die Einheit der Arbeit, welche eine Dyne leistet, wenn sie längs des Weges von einem Centimeter wirkt, ist ferner

$$1 \text{ Erg} = \frac{10^{-5}}{g} \text{ cmkg}$$

oder

$$1 \text{ Erg} = \frac{10^{-7}}{g} \text{ mkg.}$$

Die technische Einheit der Arbeit, das Meterkilogramm, ist also gleich 98100000 Erg und daraus ergiebt sich, dass das technische Maass der Leistung, das Sekunden-Meterkilogramm, gleich 98100000 Erg in der Sekunde ist.

Nach Gleichung (11) ist die Anzahl der Erg, welche von einem Anker des Motors in einer Sekunde geleistet wird, numerisch gleich dem Produkt aus Stromstärke und elektromotorischer Kraft in absolutem Maasse. Wenn wir diese Grösse in den technischen Einheiten Ampère und Volt ausdrücken wollen, so erhalten wir

$$A = 10^{-8} \times 10^{1} \text{ Voltampère} = 10^{-7} \text{ Watt,}$$

d. h. 1 Erg in der Sekunde $= 10^{-7}$ Watt.

Nun war aber auch

$$1 \text{ Erg in der Sekunde} = \frac{10^{-7}}{g} \text{ Sekunden-Meterkilogramm,}$$

folglich

$$1 \text{ Sekunden-Meterkilogramm} = g \text{ Watt}$$

oder

$$0{,}102 \text{ Sekunden-Meterkilogramm} = 1 \text{ Watt.}$$

Die Arbeit, die nöthig ist, um 75 kg in einer Sekunde ein Meter hoch zu heben, ist die Pferdestärke im metrischen System, also

$$1 \text{ P} = 75 \times 9{,}81 \text{ Watt}$$

oder rund

$$1 \text{ P} = 736 \text{ Watt.}$$

Bedeutet E_a die elektromotorische Gegenkraft des Ankers in Volt, J_a die Stromstärke in Ampère, so ist die Leistung des Ankers (in P ausgedrückt):

$$A = \frac{E_a J_a}{736}, \quad \ldots\ldots\ldots \quad (12)$$

oder nach den Gleichungen (5) und (6)

$$A = \frac{1}{736} J_a z \nu \sigma \frac{n}{60} 10^{-8}, \quad \ldots\ldots \quad (13)$$

$$A = \frac{2}{736} J_a a b m \nu \sigma \frac{n}{60} 10^{-8} \quad \ldots\ldots \quad (14)$$

Die Kraft, welche man in Wirklichkeit erhält, ist etwas kleiner, da gewisse Verluste auftreten, die in Folge der mechanischen und magnetischen Reibung entstehen. Die erstere setzt sich zusammen aus der Reibung, welche die Achse in den Lagern erleidet und die Bürsten an dem Kommutator erfahren, und aus dem Widerstande, welchen die Luft der Rotation des Ankers entgegensetzt. Die magnetische Reibung ist etwas komplicirterer Natur: sie zeigt sich in verschiedener Weise, besonders bewirkt sie eine Erwärmung des Ankerkernes und der Polschuhe. Wenn der Ankerkern nicht genügend getheilt ist, ein Fehler, der oft bei kleinen Motoren vorkommt, so werden Ströme in ihm hervorgerufen, die desto stärker sind, je stärker das magnetische Feld und je grösser die Geschwindigkeit ist. Die Erscheinung ist gerade so, als ob sich in dem Motor eine kurz geschlossene Dynamomaschine befände und als ob die Kraft, welche nöthig ist, um den Strom dieser Dynamomaschine zu erzeugen, von dem Strom geliefert werden müsste, der durch die Ankerwindungen des Motors fliesst; diese Kraft geht natürlich alsdann für die Nutzarbeit verloren. Eine andere Quelle des Energieverlustes ist die beschränkte Zahl der Kommutatorsegmente. Bei der Herleitung unserer Formeln nahmen wir an, dass die Summe der Ströme in den verschiedenen Drähten durch eine kontinuirliche halbkreisförmige Stromschicht ersetzt werden könne. Diese Annahme ist streng genommen nur für den Fall richtig, dass die Zahl der Drähte und die entsprechende Anzahl der Segmente unendlich gross ist. Wenn aber die Zahlen endlich sind und besonders wenn ein Kommutatorsegment einer grossen Spule entspricht, die aus sehr vielen Drahtwindungen besteht, so erzeugt der Wechsel des Kontaktes zwischen den Bürsten und den aufeinander folgenden Kommutatorsegmenten plötzliche Wechsel in der magnetisirenden Wirkung des Stromes auf den Ankerkern; anstatt dass unsere Stromschicht im Raum fest ist, wie wir oben annahmen, macht sie also vielmehr starke Schwingungen, deren Amplitude gleich dem Winkelabstand zweier benachbarter Spulen ist. Die Erscheinung macht denselben Eindruck, als ob ein rechtwinklig zu der Mittellinie der Polschuhe aufgestellter Magnet in schnelle Schwingungen versetzt würde, und da jeder Magnet, welcher in der Nachbarschaft von Metallmassen sich bewegt, diese erwärmt und dadurch Energie verzehrt, so folgt, dass die Polschuhe warm werden müssen, und dass ein Theil der vom Motor erzeugten Energie auf diese Weise verloren geht. Der Verlust kann offenbar dadurch verkleinert werden, dass man die Anzahl der Kommutatorsegmente vermehrt und die Polschuhe in einer auf der Achse des Ankers rechtwinkligen Richtung zerschneidet.

Eine andere Verlustquelle liegt bei manchen Motoren in der Diskontinuität des Ankerkernes. Bei den Gramme'schen Ankern mit weichem cylindrischen Kern ist es nicht der Fall, aber wohl bei Ankern von der Pacinotti'schen Art, wo der hervortretende Zahn, wenn er dicht an den Polflächen vorbeigeht, auf diese eine Rückwirkung ausübt und in ihnen Wirbelströme erzeugt, welche ihrerseits wieder eine verzögernde Kraft auf den Vorsprung ausüben. Dass dies wirklich der Fall ist, kann man in schlagender Weise bei vielen Dynamomaschinen nachweisen, welche Pacinotti'sche Vorsprünge haben, besonders bei den Maschinen von Brush und von Weston. Jeder, der diese Maschinen geprüft hat, muss nach einigen Stunden des Betriebes gemerkt haben, dass die Polschuhe besonders da, wo die Spulen und Vorsprünge sie verlassen, heiss werden. An der Eintrittsstelle ist die Erwärmung nicht so gross, weil dort die magnetisirende Wirkung des Ankerstromes die Kraftlinien zurücktreiben und schwächen muss, während sie dieselben an der Austrittsstelle anzieht und verstärkt. Wenn die Maschinen als Motoren benutzt werden, so wird die entgegengesetzte Wirkung hervorgerufen: die Polschuhe werden an der Eintrittsstelle erwärmt. Kerne mit Pacinotti'schen Vorsprüngen sind sehr beliebt bei den Konstrukteuren von Motoren, weil man glaubt, dass sie die magnetische Anziehung vergrössern, welche die Kraft des Motors bestimmt. Rein theoretische Ueberlegungen sprechen auch dafür. Wir werden nämlich sogleich zeigen, dass die Anzahl der Kraftlinien z, welche vom Polschuh zum Anker gehen, um so grösser ausfällt, je kleiner der Luftzwischenraum zwischen beiden ist, und wenn man den Vorsprung so weit vorstehen lässt, dass er fast die Polflächen berührt, so kann dadurch der magnetische Widerstand des Luftzwischenraumes bedeutend verkleinert werden. Es hat sich jedoch als nothwendig herausgestellt, den Zwischenraum zwischen der äussern Oberfläche des Zahnes und der innern Oberfläche der Polschuhe viel grösser zu machen, als für die freie Rotation des Ankers erforderlich ist, und man kann nach alledem daran zweifeln, ob der Pacinotti'sche Kern eine so grosse Verbesserung gegen den Gramme'schen bedeutet, wie er es aus rein theoretischen Gründen zu sein scheint.

Aber selbst in Ankerkernen, die vollständig getheilt sind und an der Aussenseite keine Vorsprünge tragen, tritt noch eine andere Verlustquelle auf. Sie rührt von derjenigen molekularen Wirkung im Eisen her, welche von Ewing als *Hysteresis* bezeichnet ist. Bei gewöhnlichen Motoren, welche ein oder zwei Feldmagnete haben, ist dieser Verlust jedoch sehr klein und kann dort im Allgemeinen vernachlässigt werden.

Bei guten Motoren ist die Summe aller hier aufgezählten Verluste nur ein kleiner Bruchtheil der gesammten Kraft. Das Verhältnis des Verlustes zu der wirklich an der Welle verfügbaren Energie wird der Wirkungsgrad der Umsetzung genannt, er sollte bei mittlern und grossen Motoren nie kleiner als 90 % sein.

Der elektrische Wirkungsgrad des Motors ist das Verhältnis der innern Energie (in P), wie sie durch die Formeln (13) und (14) angegeben wird, zu der Grösse der äussern Energie (in P), welche an den Klemmen des Motors zugeführt wird. Es sei

E_a die elektromotorische Kraft in den Ankerspulen,

E_b die elektromotorische Kraft an den Bürsten,

E_k die elektromotorische Kraft an den Klemmen;

W_a der Widerstand des Ankers,

W_d der Widerstand der direkten Windungen der Feldmagnete,

W_n der Widerstand der Nebenschlusswindungen der Feldmagnete.

J, J_a, J_d und J_n mögen bezw. die Stärke des äussern Stroms, des Stroms im Anker und in der Haupt- und Nebenschlusswicklung der Feldmagnete bezeichnen.

Alsdann gelten offenbar für eine Dynamomaschine mit gemischter Wicklung, bei welcher der Nebenschluss zum Anker parallel geschaltet ist, die folgenden Gleichungen:

$$J = J_d, \quad J_n = \frac{E_b}{W_n},$$

$$J_a = J_d + J_n, \quad \ldots \quad (15)$$

$$E_b = E_a - W_a J_a, \quad \ldots \quad (16)$$

$$E_k = E_b - W_d J_d. \quad \ldots \quad (17)$$

Der elektrische Wirkungsgrad ist

$$\eta = \frac{E_k J}{E_a J_a}. \quad \ldots \quad (18)$$

Für einen Elektromotor mit gemischter Wicklung lauten die Gleichungen

$$J = J_d, \quad J_n = \frac{E_b}{W_n},$$

$$J_a = J_d - J_n, \quad \ldots \quad (19)$$

$$E_b = E_k - W_d J_d, \quad \ldots \quad (20)$$

$$E_a = E_b - W_a J_a, \quad \ldots \quad (21)$$

$$\eta = \frac{E_a J_a}{E_k J}. \quad \ldots \quad (22)$$

Wenn der Nebenschluss zum äussern Stromkreis parallel geschaltet ist, so sind die Formeln für die Dynamomaschine

$$J = J_d - J_n, \quad J_n = \frac{E_k}{W_n}, \quad J_a = J_d$$

und Gl. (16), (17) und (18) bleiben ungeändert.

Für den Motor haben wir

$$J_d = J - J_n, \quad J_n = \frac{E_k}{W_n}, \quad J_a = J_d$$

und Gl. (20), (21) und (22) bleiben ungeändert.

Dieselben Formeln sind sowohl auf die Dynamomaschinen, wie auf die Motoren mit reiner Hauptstrom- oder reiner Nebenschlusswicklung anwendbar: man hat nur in dem Falle von Hauptstrommaschinen $W_n = \infty$ und im Falle von Nebenschlussmaschinen $W_d = 0$ zu setzen.

Viertes Kapitel.

Typen von Feldmagneten. — Typen von Ankern. — Erregende Kraft. — Magnetischer Kreis. — Magnetischer Widerstand. — Formeln für die Feldstärke. — Einfache und doppelte Magnete. — Schwierigkeit bei kleinen Dynamomaschinen. — Charakteristik. — Vorausberechnung von Charakteristiken. — Rückwirkung des Ankers. — Kurven konstanter Leistung. — Geschwindigkeitscharakteristiken. — Anwendung auf elektrische Bahnen.

Im vorhergehenden Kapitel haben wir gezeigt, wie die elektromotorische Kraft eines Ankers gefunden werden kann, wenn die gesammte Anzahl der Kraftlinien, welche durch seinen Kern geht, bekannt ist. Wir wollen nun aus den Dimensionen der Maschine die Anzahl der Kraftlinien bestimmen, d. h. die Stärke des magnetischen Feldes. Bevor wir jedoch diese Aufgabe angreifen, dürfte es von Interesse sein, einen Blick auf die einzelnen Typen der Feldmagnete zu werfen, welche von den verschiedenen Fabrikanten von Dynamomaschinen und Motoren angenommen sind. Sie sind in Fig. 27 bis 51 dargestellt. Um die Anordnung verständlich zu machen, ist unter jedem Feldmagnet der Ankertypus beigefügt, oben steht der Name des Fabrikanten oder Erfinders. Wir unterscheiden drei Arten von Ankern: 1. Die *Trommel,* welche nach der Hefner-Alteneck'schen Methode gewickelt ist und welche wir im zweiten Kapitel (Fig. 18 und 19) beschrieben haben; 2. den *Cylinderring*, welcher nach der Pacinotti'schen oder Gramme'schen Methode gewickelt ist und welchen wir ebenfalls im zweiten Kapitel (Fig. 20 und 25) besprachen, und 3. den *Flachring*, der sich nur durch die Form des Kerns von dem vorhergehenden unterscheidet.

Alle Magnete, welche man bei Dynamomaschinen und Motoren anwendet, sind hufeisenförmig; gerade Stabmagnete mit Polen an

Edison-Hopkinson.

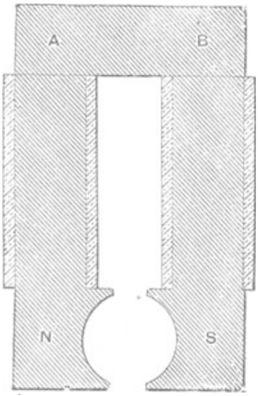


Fig. 27.
Trommel.

Manchester.

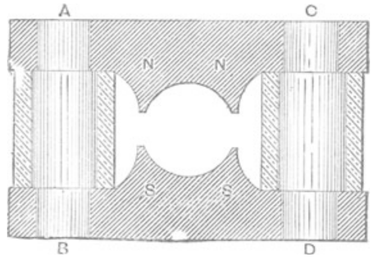


Fig. 28.
Kurzer Cylinder.

Siemens.

Fig. 29.
Trommel.

Crompton.

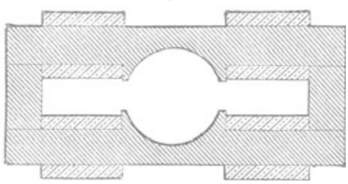


Fig. 30.
Cylinder.

den Enden werden nie gebraucht. Dies hat darin seinen Grund, dass wir in allen Fällen entgegengesetzte Pole an denselben Anker nahe heranbringen müssen. Man muss zwischen einfachen, doppelten und mehrfachen Magneten unterscheiden. Bei dem einfachen Hufeisenmagnet gehen alle Kraftlinien, die den Anker durchlaufen, in derselben Richtung durch den Magnet. Als Beispiel können wir die Edison-Hopkinson'sche Dynamomaschine (Fig. 27) betrachten. Die Kraftlinien, welche von N durch den Anker hindurch nach S gehen, laufen alle in derselben Richtung weiter, nämlich vertikal aufwärts von S nach B, dann quer durch das Joch von B nach A und zuletzt vertikal abwärts von A nach N. Ein freier Magnetpol

Elwell-Parker.

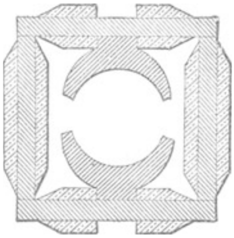


Fig. 31.
Cylinder.

Elwell-Parker.

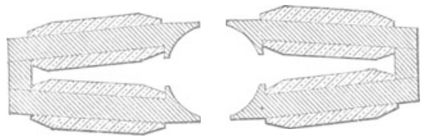


Fig. 32.
Langer Cylinder.

Paterson und Cooper.

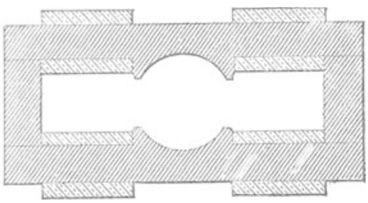


Fig. 33.
Kurzer Cylinder.

Goolden und Trotter.

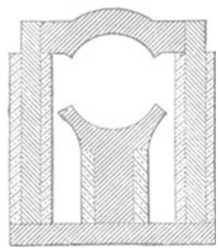


Fig. 34.
Kurzer Cylinder.

Goolden und Trotter. Gramme.

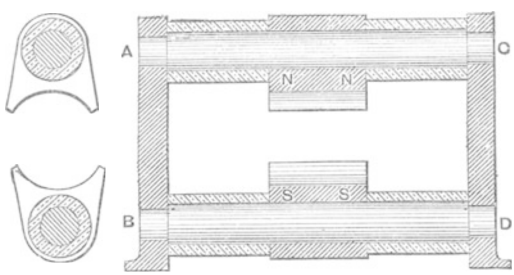


Fig. 35.
Kurzer Cylinder.

Andrews.

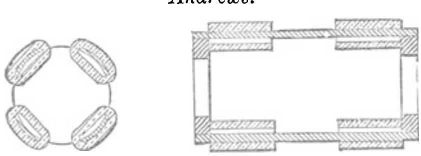


Fig. 36.
Kurzer Cylinder.

Jones.

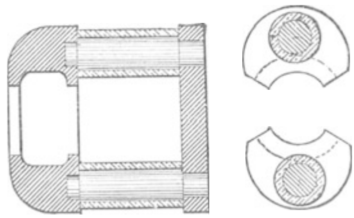


Fig. 37.
Kurzer Cylinder.

Kapp.

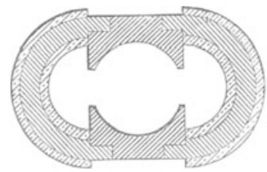


Fig. 38.
Cylinder.

Kapp.

Fig. 39.
Cylinder.

Kapp.

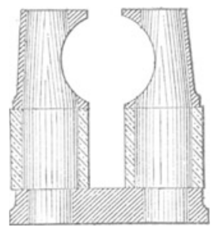


Fig. 40.
Kurzer Cylinder.

Weston.

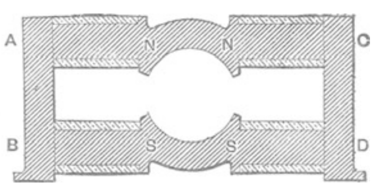


Fig. 41.
Trommel.

Maxim.

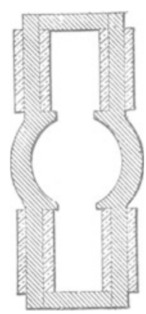


Fig. 42.
Cylinder.

würde sich längs eines geschlossenen magnetischen Kreises *NSBAN* bewegen und könnte keinen andern Weg einschlagen. In einem doppelten Hufeisen, wie es die Weston'sche Maschine (Fig. 41) aufweist, giebt es zwei Wege, längs denen sich der Magnetpol bewegen kann. Der eine verläuft längs *NSBAN*, der andere längs

Thomson-Houston.

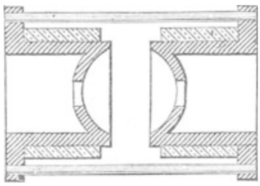


Fig. 43.

Kugel.

Schuckert.

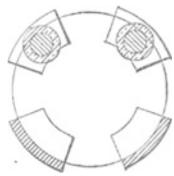


Fig. 44.

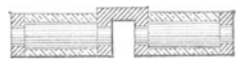


Fig. 45.

Flachring.

Brush.

Fig. 46.

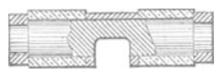


Fig. 47.

Flachring.

Gramme.

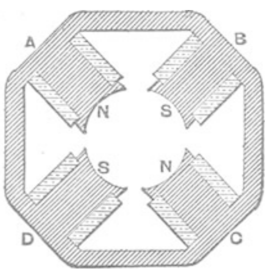


Fig. 48.

Cylinder.

De Meritens.

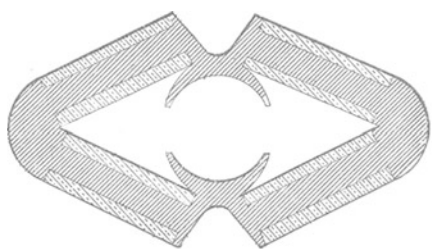


Fig. 49.

Cylinder.

Jürgensen.

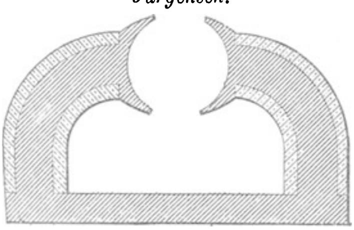


Fig. 50.

Cylinder.

Marcel Deprez.

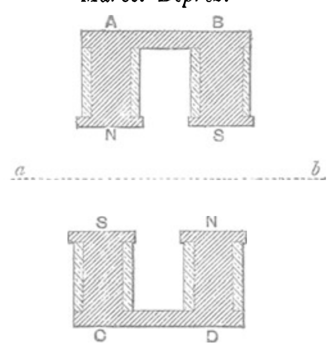


Fig. 51.

Zwei Cylinder.

NSDCN oder mit andern Worten, von der gesammten Anzahl der Kraftlinien, welche durch den Anker gehen, läuft die eine Hälfte durch das Hufeisen *NABS* und die andere durch das Hufeisen *NCDS*. Wir können die Sache auch so auffassen, als ob die Feldmagnete aus zwei Hufeisen beständen, welche sich mit gleichen Polen berühren. Die Anordnung der Manchester-Dynamomaschine (Fig. 28) ist ähnlich, aber in diesem Falle bilden die Stücke *AB* und *CD*, welche bei der Weston'schen Maschine das Joch bilden, die erregenden Theile der Magnete und sind deshalb von den Magnetisirungsspulen umgeben. Die Feldmagnete der ursprünglichen Gramme'schen Dynamomaschine (Fig. 35) bestehen ebenfalls aus einem doppelten Hufeisen. Aber hier geht die Ebene, welche man durch die Achsen der Magnetkerne legen kann, auch durch die Mittellinie der Ankerwelle, während sie bei dem Weston'schen Typus senkrecht darauf steht. Hier spalten sich ferner die Kraftlinien rechts und links von der Ebene der Magnete in zwei verschiedene Kreise. Fig. 37 zeigt eine ähnliche Anordnung, aber nur mit einem Magnet. Fig. 39, 40 und 50 zeigen einfache Magnete, deren Ebene auf dem Anker senkrecht steht. Fig. 48 zeigt einen vierfachen Hufeisenmagnet. Hier gehören die Kraftlinien, welche durch den Anker gehen, den vier verschiedenen Kreisen *SDAN*, *SDCN*, *SBAN* und *SBCN* an. Die Feldmagnete der Schuckert'schen Maschine, welche in Fig. 44 und 45 dargestellt werden, bestehen aus acht vollständigen Hufeisen, vier auf jeder Seite des Flachringes; bei einigen multipolaren Maschinen ist die Zahl der magnetischen Kreise noch grösser. Die Maschinen (Fig. 51), welche Marcel Deprez bei seinen Versuchen benutzte, hatten zwei Ringanker, die auf derselben Achse *AB* befestigt und längs deren Peripherie acht Hufeisen aufgestellt waren, von denen zwei, *SBAN* und *SCDN*, in der Zeichnung zu sehen sind. Es ist nicht nothwendig, die gezeichneten Typen zu beschreiben, da die Figuren hinreichend für sich sprechen.

Da die eigentliche Aufgabe der Feldmagnete darin besteht, Kraftlinien zu erzeugen, die den Ankerkern durchsetzen, so sind alle andern Kraftlinien, welche an dem Anker vorbeigehen, für die Leistungsfähigkeit der Maschine nutzlos, ja selbst schädlich. Je grösser die Anzahl der nützlichen Kraftlinien ist, um so grösser ist die elektromotorische Kraft, welche bei einer gegebenen Geschwindigkeit in einem bestimmten Anker entsteht. Es muss daher unser Ziel sein, ein Maximum von Kraftlinien zu erzeugen, und um diese

Forderung zu erfüllen, bestimmen wir zuerst die Beziehung zwischen der Anzahl der Kraftlinien und den konstruktiven Daten der Maschine. Zu ihnen gehört die erregende Kraft, d. h. das Produkt aus den Drahtwindungen des Magnets und dem magnetisirenden Strom, welcher durch den Draht fliesst. Man rechnet die erregende Kraft gewöhnlich nach *Ampèrewindungen* und hat experimentell und theoretisch bewiesen, dass die Art, in welcher das Produkt sich zusammensetzt, ganz gleichgültig ist. Man kann eine grosse Anzahl Windungen von feinem Draht und eine geringe Stromstärke oder wenige Windungen dicken Drahts und eine hohe Stromstärke haben: die Wirkung ist stets dieselbe, wenn das Produkt aus der Zahl der Ampère und der der Windungen gleich ist. Der Versuch zeigt ferner, dass die im Anker hervorgerufene elektromotorische Kraft für geringe Magnetisirungsgrade der erregenden Kraft X der Feldmagnete nahezu proportional ist; und da die elektromotorische Kraft immer der Feldstärke z proportional ist, so ist in diesen Fällen z auch proportional X. Wir können diese Beziehung dadurch mathematisch darstellen, dass wir den Begriff des *magnetischen Widerstandes* einführen. Hiernach giebt es in jedem magnetischen Kreise eine passive Kraft, welche sich der Entstehung von Kraftlinien widersetzt, und die Anzahl von Kraftlinien, welche hervorgerufen wird, ist gleich dem Quotienten aus magnetisirender Kraft und magnetischem Widerstande. Wenn wir den letztern mit R bezeichnen, so haben wir

$$z = \frac{X}{R} \quad \quad (23)$$

Diese Formel ist streng richtig, wenn es uns gelingt, für jeden Magnetisirungsgrad den magnetischen Widerstand zu bestimmen. Für geringe Grade der Magnetisirung ist der Widerstand nahezu konstant, und in diesen Fällen existirt eine einfache Proportionalität zwischen z und X; für höhere Magnetisirungsgrade wächst der Widerstand, und die Beziehung zwischen z und X wird komplicirter. Zuletzt erreicht man eine Grenze, über welche hinaus wir die Feldstärke nicht mehr vergrössern können. In diesem Falle ist der magnetische Widerstand unendlich gross geworden: man sagt alsdann, der Magnet ist *gesättigt*.

Die Beziehungen, die zwischen der magnetisirenden Kraft und dem magnetischen Moment bestehen, sind für den Fall von Stab-magneten, Kugeln und Ellipsoiden von Jacobi, Dub, Müller u. a. untersucht worden, und man hat eine Menge Formeln aufgestellt, um diese Beziehungen mathematisch auszudrücken. Abgesehen davon, dass die Formeln nur rohe Annäherungen sind, die meistens nur unvollkommen mit den Resultaten der Versuche übereinstimmen, sind sie für unsere vorliegenden Zwecke auch deshalb unbrauchbar, weil die Feldmagnete der Dynamomaschinen und Motoren keine gerade Stabform haben, sondern aus Hufeisen von jeder möglichen Gestalt bestehen. In einigen Fällen haben diese Formeln selbst zu falschen Schlüssen geführt, wofür wir als Beispiel die ursprünglichen Edison'schen Maschinen anführen können. Nach der Theorie ist das magnetische Moment eines cylinderförmigen Stabes einer Funktion der erregenden Kraft, der Quadratwurzel des Durchmessers und der Quadratwurzel aus der dritten Potenz der Stablänge proportional. Um also ein Maximum des magnetischen Moments bei einem gegebenen Eisengewicht zu erhalten, müssen wir ihm die Gestalt eines langen Cylinders geben; die ursprünglichen Edison'schen Maschinen waren nach diesen Grundsätzen gebaut. Die Erfahrung hat uns jedoch gelehrt, dass dies die schlechteste Form war, die man annehmen konnte, und die später gebauten Edison'schen Maschinen haben deshalb starke und kurze Magnete. Die Erklärung für diesen scheinbaren Zwiespalt zwischen Theorie und Praxis liegt darin, dass bei einer Dynamomaschine oder einem Motor das magnetische Moment jedes einzelnen Schenkels der Feldmagnete von keiner Bedeutung ist, da die elektromotorische Kraft nur von der gesammten Anzahl der hervorgerufenen Kraftlinien abhängt, die durch ganz andere Gesetze bestimmt wird, wie das magnetische Moment.

Es wäre sehr wünschenswerth, dass die mathematischen Beziehungen zwischen Feldstärke und erregender Kraft für jene Magnetformen aufgestellt würden, die wirklich bei der Konstruktion von Dynamomaschinen und Motoren verwendet werden. Es sind jedoch noch keine streng gültigen Formeln für alle Magnetisirungsgrade gefunden worden, und die Schwierigkeit liegt hauptsächlich darin, dass die chemische Zusammensetzung und die molekularen Eigenschaften des Eisens hierbei eine wichtige Rolle spielen, welche nicht leicht im Voraus zu bestimmen ist. Dies ist besonders bei hohen, der Sättigungsgrenze nahen Magnetisirungsgraden der Fall. Für niedrige Magnetisirungsgrade sind die Schwierigkeiten zwar noch vorhanden, aber doch von verhältnismässig geringerer Bedeutung, und hier ist es möglich, Formeln für die Feldstärke aufzustellen, die für praktische Zwecke hinreichend genau sind.

Es mögen in Fig. 52 eine Reihe keilförmiger und sehr kurzer Magnete M_1, M_2 ... so zusammengesetzt sein, dass sie sich mit entgegengesetzten Polflächen berühren und einen kontinuirlichen Ring bilden, der nur durch den Luftzwischenraum ABA_1B_1 unterbrochen ist. Es gehen alsdann Kraftlinien durch diesen Zwischenraum, und es entsteht eine elektromotorische Kraft, wenn man einen oder mehrere Leiter so bewegt, dass die Kraftlinien geschnitten werden. Es möge die Polfläche jedes Elementarmagnets gleich S sein, und die Dichtigkeit der magnetischen Masse, welche wir uns über die Polfläche vertheilt denken, gleich ω; alsdann ist ωS die Stärke jeder Polfläche. Nach der Ampère'schen Theorie kann jeder Elementar-

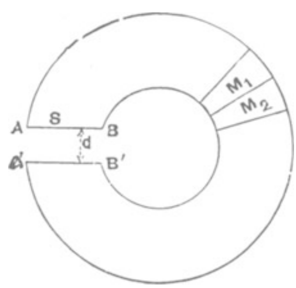


Fig. 52.

magnet durch eine magnetische Doppelfläche (Seite 28) ersetzt werden; diese ist äquivalent einem geschlossenen Stromkreis, in dem ein Strom fliesst, dessen Stärke multiplicirt mit der eingeschlossenen Fläche dem magnetischen Moment des Elementarmagnets gleich ist. Denken wir uns nun die Magnete durch Drahtspulen oder Solenoide ersetzt, so können wir, ohne einen merklichen Fehler zu begehen, jede Drahtwindung der Spule als einen in sich geschlossenen Stromkreis betrachten, und wenn wir ν solcher Windungen haben und die Stromstärke gleich J ist, so ist das gesammte magnetische Moment in absolutem Maasse gleich νJS. Da sich die Polflächen mit Ausnahme der beiden Endflächen AB und A_1B_1 berühren und keine Wirkung in die Ferne ausüben können, so wird das gesammte magnetische Moment der Reihe von Elementarmagneten durch das

Produkt des Magnetismus auf den Endflächen und deren Entfernung l dargestellt. Wir erhalten deshalb die Gleichung

$$\omega S l = \nu J S.$$

Wir haben gezeigt (Seite 26), dass die Anzahl aller Kraftlinien, welche vom Einheitspol ausgehen, gleich 4π ist. Von einem Pol, dessen Stärke gleich ωS ist, gehen also $4\pi\omega S$ Kraftlinien aus. Es möge nun z die Anzahl aller Kraftlinien oder die Feldstärke in dem Luftzwischenraum sein, dann haben wir

$$z = 4\pi\omega S,$$

und wenn wir für ωS seinen Werth aus der obigen Gleichung einsetzen,

$$z = \frac{4\pi\nu J S}{l}$$

oder

$$z = 4\pi \frac{\nu J}{\frac{l}{S}}.$$

Hier bedeutet νJ die erregende Kraft in absolutem Maass oder in Ampèrewindungen $\times 10^{-1}$, S die Polfläche und l den Abstand beider Pole.

Bei der Ableitung dieser Formel haben wir angenommen, dass die Polflächen parallele Ebenen sind, aber es lässt sich nachweisen, dass sie allgemein für Oberflächen von irgend einer Form gültig ist, vorausgesetzt, dass ihr Abstand im Verhältnis zu ihrem Flächeninhalt sehr klein ist. Wir können deshalb die Formel auch auf den Fall anwenden, wo ein cylinderförmiger Hohlraum, dessen Seitenflächen die Pole bilden, theilweise von einem cylinderförmigen Anker ausgefüllt wird. Wir haben hier zwei Luftzwischenräume; die Polfläche S ist das Produkt aus der Länge b des Ankers in den Bogen λ, der von jedem Pol eingenommen wird. Es möge δ die Entfernung zwischen der Polfläche der Magnete und der äussern Oberfläche des Ankerkerns sein und X gleich der erregenden Kraft, welche z Kraftlinien hervorbringt; alsdann geht die obige Formel über in

$$z = 4\pi \frac{X}{\frac{2\delta}{\lambda b}}$$

oder

$$z = \frac{X}{\frac{2\,\delta}{4\,\pi\,\lambda\,b}} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (24)$$

Die Feldstärke wird also durch den Quotient der erregenden Kraft und einer Grösse dargestellt, welche gleich einer Länge dividirt durch eine Fläche ist. Die Analogie mit dem Ohm'schen Gesetz ist offenbar. Denn der elektrische Widerstand ist gleich dem specifischen Widerstand multiplicirt mit der Länge und dividirt durch den Querschnitt des Drahtes. In derselben Weise findet man den magnetischen Widerstand des Luftraums, wenn man $\frac{1}{4\pi}$ mit der Länge $2\,\delta$ multiplicirt und durch den Querschnitt $\lambda\,b$ des Luftraumes dividirt. Wir können daher $\frac{1}{4\pi}$ als specifischen magnetischen Widerstand der Luft betrachten. Die Gleichung (24) giebt die Feldstärke in absoluten Einheiten an; δ, λ und b sind in Centimeter ausgedrückt. Wollen wir die erregende Kraft in Ampèrewindungen (X_{aw}) schreiben, so lautet die Gleichung

$$z = \frac{X_{aw}}{\frac{10}{4\,\pi}\,\frac{2\,\delta}{\lambda\,b}} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (24\,a)$$

Diese Formel ist nur unter der Voraussetzung zutreffend, dass es keinen andern Widerstand in dem magnetischen Stromkreise giebt als den des Luftzwischenraums an den Polen und dass dieser Raum wirklich mit Luft gefüllt ist und mit keinem andern Stoffe. Die verschiedenen Materialien unterscheiden sich nämlich in Bezug auf den Widerstand, den sie dem Durchgang der Kraftlinien entgegenstellen; sie sind von verschiedener *Permeabilität* in Bezug auf die magnetischen Kraftlinien. Eisen hat die grösste Permeabilität, alsdann folgt Nickel und Kobalt. Im Allgemeinen kann die magnetische Permeabilität jedes Stoffes durch einen Koefficienten μ ausgedrückt werden, welcher seine Permeabilität im Verhältnis zu der der Luft darstellt. Letztere wird gleich 1 angenommen. Die Gleichung (24) gilt, wenn der Zwischenraum der Pole mit Luft angefüllt ist; befindet sich aber dort eine Substanz, deren Permeabilität μ ist, so haben wir

$$z = \frac{\mu X_{aw}}{\frac{10}{4\pi} \frac{2\delta}{\lambda b}} \quad \text{. . . . . (24b)}$$

Die Formeln (24) und (24b) wurden dadurch gewonnen, dass wir den *Induktionsfluss* (Anzahl der magnetischen Kraftlinien) bestimmten, der durch den Luftzwischenraum einer Dynamomaschine verläuft. Nun können wir aber auch die Formeln auf andere Theile des Kreises z. B. auf das Eisen des Ankers selbst anwenden. Zu diesem Zweck brauchen wir die Fläche λb nur durch den Querschnitt A_a des Ankereisens und die Weglänge 2δ durch den Weg L_a zu ersetzen, den die Kraftlinien im Ankerkern zurücklegen. Ist uns alsdann die Permeabilität μ bekannt, so giebt uns die Formel den Induktionsfluss, der von der erregenden Kraft X_a erzeugt wird, wenn wir voraussetzen, dass kein anderer Theil des magnetischen Kreises dem Induktionsfluss einen Widerstand bietet. Ebenso kann die Formel dazu dienen, die erregende Kraft zu bestimmen, die einen bestimmten Induktionsfluss z_a im Anker hervorruft, oder die erregende Kraft X_m, die erforderlich ist, einen bestimmten Induktionsfluss z_m durch die Feldmagnete zu treiben. Durch Addition der verschiedenen erregenden Kräfte erhalten wir alsdann die gesammte erregende Kraft für den ganzen magnetischen Kreis.

Die Formel (24b) lässt sich auch in folgender Form schreiben

$$X = \frac{1}{\mu} \frac{L}{4\pi A} z$$

oder

$$X_{aw} = \frac{1}{\mu} \frac{1}{1{,}256} \frac{L}{A} z$$

oder

$$X_{aw} = \frac{0{,}8}{\mu} \frac{L}{A} z \quad \text{. . . . . (25)}$$

Die gesammte erregende Kraft, die erforderlich ist, den Induktionsfluss z_a durch den Anker und den Induktionsfluss z_m durch die Feldmagnete einer Maschine zu treiben, wie sie schematisch in Fig. 53 gezeichnet ist, wird dargestellt durch die Formel

$$X_{aw} = 0{,}8 \frac{z_a}{\lambda b} 2\delta + \frac{0{,}8}{\mu} \frac{z_a}{A_a} l + \frac{0{,}8}{\mu} \frac{z_m}{A_m} L. \quad \text{. . (26)}$$

Für eine Maschine mit einem doppelhufeisenförmigen Feldmagnet, wie sie Fig. 54 zeigt, gilt dieselbe Formel; jedoch haben wir hier nur die Hälfte des Induktionsflusses in Rechnung zu stellen, da

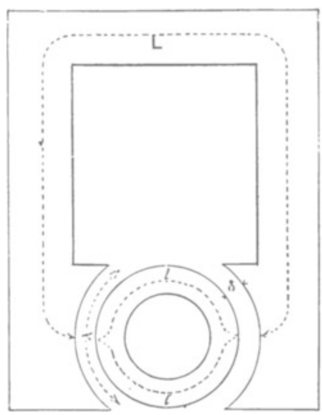


Fig. 53.

zwei magnetische Kreise vorhanden sind, von denen jeder nur die Hälfte der Kraftlinien enthält, die die elektromotorische Kraft hervorrufen.

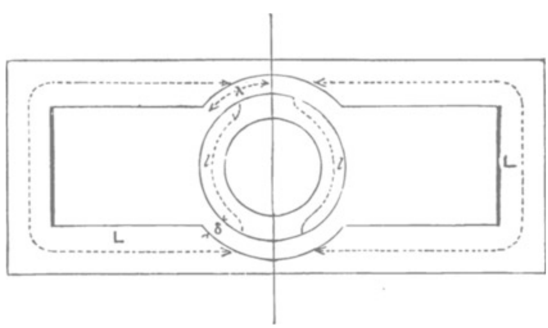


Fig. 54.

Wir wollen besonders darauf hinweisen, dass der Induktionsfluss im Anker und in den Feldmagneten verschiedene Werthe besitzt. Es ist stets $z_m > z_a$. Denn die Kraftlinien werden in den Feldmagneten erzeugt und dann durch den Anker *getrieben.* Ein

Theil der Kraftlinien geht aber hierbei an dem Anker vorbei, eine Erscheinung, die man als *magnetische Streuung* bezeichnet; wir werden sogleich näher darauf eingehen.

Wollen wir die Formel (26) anwenden, so muss uns natürlich in jedem einzelnen Fall der Werth von μ gegeben sein. Diese Grösse ist keineswegs konstant, sondern hängt von der *Induktion* (der Anzahl von Kraftlinien, die auf das Quadratcentimeter kommen) ab, die gleich dem Verhältnis z/A (des gesammten Induktionsflusses zum Querschnitt) ist und allgemein mit $\mathfrak{B}$ bezeichnet wird. Gleichung (25) lässt sich deshalb auch in folgender Form schreiben:

$$X_{aw} = \frac{0{,}8}{\mu} \mathfrak{B} L$$

oder

$$\frac{X_{aw}}{L} = \frac{0{,}8}{\mu} \mathfrak{B}.$$

Das Verhältnis $\frac{X_{aw}}{L}$ bezeichnet offenbar die Anzahl der Ampèrewindungen, die für jedes Centimeter der Weglänge aufzuwenden sind, wenn in dem Materiale die Induktion $\mathfrak{B}$ erzeugt werden soll. Kennen wir die Permeabilität, die einem bestimmten Werth der Induktion entspricht, so lässt sich die Zahl der Ampèrewindungen für das Centimeter berechnen; hieraus ergiebt sich sodann die gesammte Anzahl der Ampèrewindungen für jeden Theil des magnetischen Kreises. Die Abhängigkeit der Permeabilität von der Induktion muss natürlich auf experimentellem Wege für die bestimmten Eisensorten ermittelt werden, die man für den Ankerkern und für die Feldmagnete in Anwendung bringt. Es würde den Rahmen dieses Buches überschreiten, wenn wir hier die magnetische Untersuchung des Eisens und die dazu erforderlichen Apparate näher beschreiben wollten. Die Permeabilität wird mit diesen Instrumenten, die von Ewing, Hopkinson, du Bois, Hartmann & Braun, vom Verfasser u. A. angegeben wurden, nicht direkt bestimmt, sondern vielmehr das Verhältnis von magnetisirender Kraft und Induktion; da die erstere nun gleich $0{,}4\,\pi \frac{X_{aw}}{L}$ ist, so thut man der Kürze halber am besten, von der Permeabilität ganz abzusehen und dafür das Verhältnis der erregenden Kraft für das Centimeter $\left(\frac{X_{aw}}{L}\right)$

zur Induktion $\mathfrak{B}$ zu bestimmen. Indem wir die zusammengehörigen Werthe von $\frac{X_{aw}}{L}$ und $\mathfrak{B}$ in einem Koordinatennetz auftragen, erhalten wir die Magnetisirungskurve des Eisens, aus der wir für jeden Werth der Induktion die entsprechende erregende Kraft für das Centimeter entnehmen können. Fig. 55 zeigt drei solche Kurven, wie sie für Gusseisen (*G*), Schmiedeeisen (*Sch*) und Stahlguss (*St*) erhalten wurden.

Um nun die erregende Kraft zu finden, die dazu erforderlich ist, einen bestimmten Induktionsfluss im Anker hervorzurufen, verfahren wir offenbar in folgender Weise. Wir bestimmen aus der Zeichnung der Maschine den Querschnitt und die Länge der einzelnen Theile des magnetischen Kreises, also des Ankerkerns, des

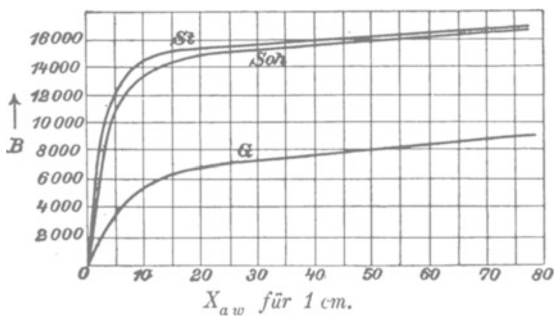


Fig. 55.

Luftzwischenraums, der Polschuhe, der Magnetkerne und des Joches. Da der gesammte Induktionsfluss und der Querschnitt jedes einzelnen Theiles bekannt sind, so ergiebt sich auch die Induktion für jeden Theil des Kreises und daraus mit Hülfe der Magnetisirungskurve (Fig. 55) die erregende Kraft, die für jeden einzelnen Theil erforderlich ist[1]).

[1]) In der ersten Auflage dieses Buches war für die Bestimmung der erregenden Kraft nur eine angenäherte Methode angegeben, die sich von der jetzt mitgetheilten genauen Bestimmungsart dadurch unterscheidet, dass man von der wirklichen Magnetisirungskurve keinen Gebrauch machte, vielmehr annahm, dass die Beziehung zwischen erregender Kraft und Induktion dem Verhältnis tang $\left(\frac{\pi}{z}\,\frac{\mathfrak{B}}{\beta}\right)\Big/\frac{\pi}{z}\,\frac{\mathfrak{B}}{\beta}$ proportional sei, wo β das Maxi-

Durch Addition der einzelnen Werthe finden wir die gesammte erregende Kraft, die dazu nöthig ist, den gegebenen Induktionsfluss im Anker hervorzurufen. In dieser Weise fahren wir fort, indem wir verschiedene brauchbare Werthe für den Induktionsfluss des Ankers annehmen und dafür die entsprechende gesammte erregende Kraft bestimmen. Tragen wir diese Werthe auf (z_a als Ordinate und X_{aw} als Abscisse), so erhalten wir die Magnetisirungskurve für die betreffende Maschine. Wird umgekehrt die Konstruktion einer Maschine verlangt, die eine bestimmte Magnetisirungskurve besitzt, so gehen wir von einer vorläufigen Konstruktion aus und untersuchen, welche

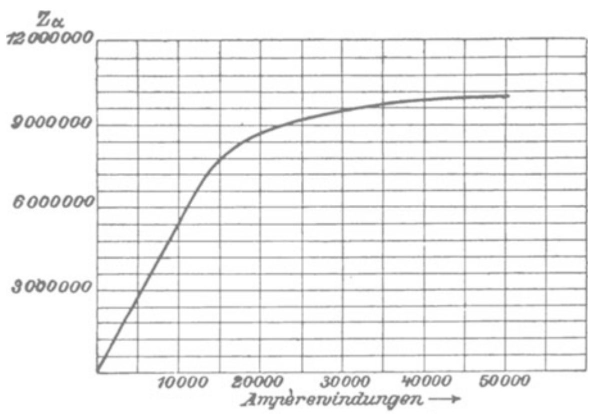


Fig. 56.

Aenderungen an den Dimensionen und an der Wicklung anzubringen sind, damit das gewünschte Resultat erreicht wird. Fig. 56 stellt

---

mum bedeutet, welches 𝔅 im Zustande der Sättigung annimmt. Hieraus liessen sich ziemlich brauchbare Resultate für das Magnetisirungsgebiet der Dynamomaschinen ableiten. Ferner war die Methode insofern bequem, als die Fabrikanten früher nicht die nöthigen Hülfsmittel besassen, um die Magnetisirungskurve der zur Anwendung gelangenden Eisensorten zu bestimmen, die Sättigungsgrenze dagegen leicht durch einen Versuch mit fertigen Maschinen gefunden werden konnte. Da es jetzt Instrumente giebt, mittelst deren auch der Techniker leicht und sicher die magnetische Untersuchung von Eisensorten ausführen kann, so ist die genaue Konstruktionsmethode mit Hülfe der vorher bestimmten Magnetisirungskurve allgemein gebräuchlich geworden.

die Magnetisirungskurve einer Maschine von folgenden Dimensionen dar: Cylinderringanker aus weichem Eisen von 45,7 cm Durchmesser, 35,5 cm Länge und 8,9 cm Tiefe; Länge λ des Polschuhbogens = 58,4 cm; Breite δ des Luftzwischenraums = 2,3 cm; mittlere Weglänge l der Kraftlinien im Ankerkern = 40,6 cm; Querschnitt A_m eines Schenkels der doppelhufeisenförmigen Feldmagnete = 419 qcm; Weglänge L der Kraftlinien in den Feldmagneten und im Joch = 168 cm.

Bevor wir dazu übergehen zu zeigen, wie man aus der Magnetisirungskurve die Wirkung der Maschine bestimmen kann, müssen wir vorher die magnetische *Streuung* besprechen. Wir haben schon oben gesehen, dass die Kraftlinien beim Uebergang von den Polschuhen in den Anker theilweise in die umgebende Luft austreten, wie es bei einem gewöhnlichen Magnet (Fig. 1) der Fall ist. Die Oberfläche des Eisens lässt sich niemals in magnetischer Beziehung vollständig isoliren, und es tritt nicht allein ein Induktionsfluss zwischen den beiden Polschuhen auf, der durch die Luft geht, sondern ebenso auch zwischen den Polschuhen und den Kernen der Feldmagnete, der Grundplatte und dem Joche. In der That findet eine magnetische Streuung zwischen allen Oberflächentheilen der Maschine statt, die eine verschiedene magnetische Spannung besitzen, gerade so wie bei einem System von elektrischen Leitern, die in eine schlecht leitende Flüssigkeit eingetaucht sind, stets ein Nebenschluss durch die Flüssigkeit vorhanden ist.

Die magnetische Streuung wird man in den meisten Fällen am einfachsten experimentell bestimmen. Es genügt eine angenäherte Bestimmung, die sich bei einer fertigen Maschine mit Hülfe einer *Probespule* und eines *ballistischen Galvanometers* leicht ausführen lässt. Wir wollen annehmen, dass dies bei einer bestimmten Maschine geschehen sei und dass wir hieraus die Streuung für eine Maschine von derselben Art, aber von andern Dimensionen ableiten wollen. Da der grösste Theil der gesammten erregenden Kraft dazu verbraucht wird, den magnetischen Widerstand des Luftzwischenraums zwischen den Polschuhen und der Ankeroberfläche zu überwinden, so können wir X_a als diejenige erregende Kraft betrachten, welcher die gesammte Streuung proportional ist. Der gesammte Induktionsfluss, der in Folge der Streuung verloren geht, ist demnach proportional X_a, dividirt durch den magnetischen Widerstand des magnetischen Nebenschlusses. Wir wollen nun annehmen, dass die linearen Dimensionen der zweiten Maschine doppelt so gross sind wie die des untersuchten Modells. Denken wir uns alsdann das ganze Streuungsgebiet von beiden Maschinen gezeichnet und in ähnliche kleine Abschnitte getheilt, so ist die Weglänge der Kraftlinien für jeden Abschnitt bei der grossen Maschine doppelt so lang als die entsprechende Strecke bei dem kleinen Modell, die entsprechenden Querschnitte verhalten sich ferner wie 4 : 1. Da der magnetische Widerstand eines Luftraums dem Quotienten aus Länge und Querschnitt proportional ist, so verhält sich im Durchschnitt der magnetische Widerstand der grossen Maschine zu dem der kleinen wie $^2/_4 : 1$, d. h. der Widerstand des magnetischen Nebenschlusses ist bei der grossen Maschine nur halb so gross als bei der kleinen. Stehen allgemein die linearen Dimensionen der beiden Maschinen im Verhältnis $\eta : 1$, so ist der Widerstand des magnetischen Nebenschlusses bei der grossen Maschine gleich dem des kleinen Modells dividirt durch η. Die linearen Dimensionen einer Maschine lassen sich am bequemsten durch den Durchmesser und die Länge des Ankers definiren. Wären alle Maschinen desselben Typus in jeder Hinsicht genau ähnlich, so genügte hierfür allein entweder der Durchmesser oder die Länge des Ankers; da aber Unterschiede in dem Verhältnis von Durchmesser und Länge des Ankers auftreten können, so definiren wir die linearen Dimensionen am einfachsten durch die Quadratwurzel aus dem Produkt von Durchmesser und Länge. Bezeichnet d den Durchmesser und l die Länge des Ankers, so ist der Widerstand des magnetischen Nebenschlusses proportional $1 : \sqrt{d\,l}$. Sein absoluter Werth ist gegeben durch

$$\varrho = \frac{k}{\sqrt{d\,l}}, \qquad \qquad (27)$$

wo k einen Koëfficienten bezeichnet, der von der besondern Bauart der betreffenden Maschine abhängt. Für Maschinen von dem Typus, wie ihn Fig. 30 und Fig. 39 darstellen, kann man $k = 0{,}21$ annehmen; für die Feldmagnete von doppelhufeisenförmiger Gestalt (Fig. 29, 30, 41) ist $k = 0{,}25$ und für aufrecht stehende Maschinen (Fig. 40) $k = 0{,}29$ zu setzen. Der magnetische Widerstand des Nebenschlusses von multipolaren Maschinen, wie sie in Fig. 48 dargestellt sind, lässt sich dadurch finden, dass man die Maschine mit einer äquivalenten zweipoligen vergleicht. Hat die erstere z. B. sechs Pole und einen Anker von 90 cm Durchmesser, so ist in Formel (27) für d nicht 90, sondern $90:3=30$ einzusetzen, da der Durchmesser im Verhältnis der Zahl der Polpaare zu verkleinern ist. Der Koëfficient k kann in diesem Falle gleich 0,29 gesetzt werden.

Ist ϱ bekannt, so erhalten wir für den gesammten Induktionsfluss ζ, der durch die Streuung verloren geht,

$$\zeta = \frac{X_a}{\varrho} \qquad (28)$$

Streng genommen, gilt diese Formel nur dann, wenn kein Strom durch den Anker fliesst. Leistet die Maschine aber Arbeit und fliesst ein Strom durch die Ankerwindungen, die sich zwischen den Polschuhen von verschiedenem Zeichen befinden, so verstärkt dieser das Feld auf der einen Seite der Bürste und schwächt es in noch stärkerm Grade auf der andern Seite, so dass die magnetische Spannung zwischen den Polschuhen etwas grösser wird, als es dem theoretischen Werthe von X_a entspricht. Die betreffenden Korrektionen sind jedoch sehr gering und können meistens vernachlässigt werden. Für den Induktionsfluss in den Feldmagneten erhält man nun:

$$z_m = z_a + \zeta;$$

dieser Werth ist in den Formeln (26) und (26a) einzusetzen.

Nach diesen Darlegungen wird dem Leser die Konstruktion von zweipoligen Dynamomaschinen und Motoren hinreichend verständlich sein; es kommt deshalb nur noch darauf an, die Theorie auf multipolare Maschinen auszudehnen, die besonders bei grossen Kraftübertragungsanlagen gebräuchlich sind.

Wir wollen uns denken, dass ein ringförmiger Anker aus einem zweipoligen Felde herausgenommen und in ein vierpoliges gebracht wird, wie es Fig. 48 darstellt. Wenn der Induktionsfluss, der von einem Polschuh ausgeht, in beiden Fällen derselbe ist, so ist offenbar die elektromotorische Kraft, die im vierpoligen Felde in einem Viertel der Ankerwicklung erzeugt wird, gleich dem Betrage, der im zweipoligen Felde in der Hälfte der Windungen hervorgerufen wird. Denn wir haben beide Mal dieselbe Anzahl von Kraftlinien, die von der gleichen Anzahl von Leitern mit derselben Geschwindigkeit geschnitten werden. Der einzige Unterschied besteht nur darin, dass sich der Strom im Anker der zweipoligen Maschine in zwei Kreisen vertheilt, während er bei der vierpoligen Maschine vier Kreise bildet, die auch vier Bürsten erfordern. Hat jede Ankerwindung in beiden

Fällen dieselbe Stromstärke, so erhalten wir daher von der vierpoligen Maschine doppelt soviel Strom als von der zweipoligen. In ähnlicher Weise liefert eine sechspolige Maschine dreimal und eine achtpolige viermal soviel Strom, wenn die elektromotorische Kraft überall dieselbe ist.

Die Zahl der Bürsten ist also jedesmal gleich der Anzahl der Pole; verbinden wir jedoch je zwei diametral einander gegenüberliegende Ankerspulen durch besondere Leiter, wie es in Fig. 57 links für eine vierpolige Maschine geschehen ist, so brauchen wir stets nur zwei Bürsten.

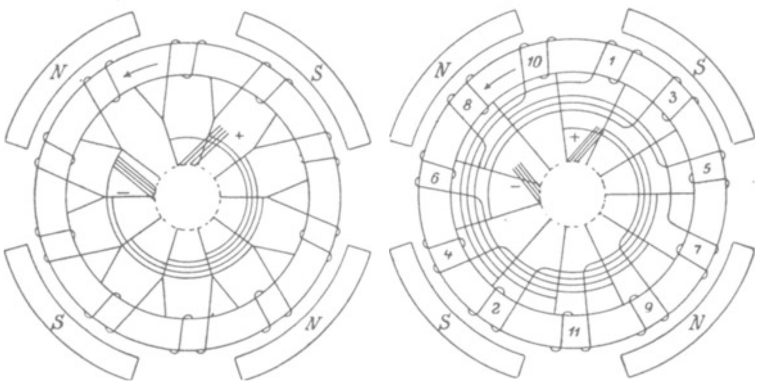


Fig. 57.

Durch Vermehrung der Pole wird also die Leistung einer Maschine in demselben Verhältnis gesteigert, und zwar wächst nur die Stromstärke, während die Spannung konstant bleibt. Wir können jedoch auch diese ändern und die Stromstärke konstant halten, wenn wir die Zahl der hintereinander geschalteten Ankerspulen vermehren. Es giebt verschiedene Wicklungsarten; als Beispiel mag die in Fig. 57 rechts dargestellte dienen. Der Einfachheit halber sind nur elf Ankerspulen gezeichnet; doch ist die Wieklungsmethode offenbar allgemein auf vierpolige Maschinen mit Ringanker und einer beliebigen ungeraden Anzahl von Ankerspulen anwendbar. Das eine Ende der Spule liegt an dem Kommutatorsegment an, während das andere nach der entgegengesetzten Seite läuft und hier den Draht trifft, der die gegenüberliegende Spule mit dem entsprechenden Kommutatorsegment verbindet. So ist das vordere Ende von Spule 1 mit dem hintern Ende von Spule 2 und dem Kommutatorsegment 2 verbunden; das vordere Ende von Spule 2 mit dem hintern Ende von 3 und dem Kommutatorsegment 3 u. s. w.; die letzte Verbindung geht von dem vordern Ende von Spule 11 nach dem hintern Ende von Spule 1 und dem Kommutatorsegment 1. Der Strom tritt an den negativen Bürsten in den Anker ein und theilt sich an dem Kommutatorsegment 6 in zwei Zweige, von denen der eine die Spulen 6, 7, 8 und 9 durchläuft und bei dem Kommutatorsegment 10 an der positiven Bürste den Anker verlässt, während der andere die Spulen 5, 4, 3, 2, 1 und 11 durchfliesst und ebenfalls am Kommutatorsegment 10 aus dem Anker heraustritt. Hätten wir statt 11 Spulen deren 103, so würde der Strom in ähnlicher Weise in 50 Spulen aufwärts und in 53 Spulen abwärts fliessen; in jeder Spule desselben Zweiges haben der Strom und die elektromotorische Kraft dieselbe Richtung, so dass sich die Spannungen, die von den beiden Polpaaren inducirt werden, addiren.

Die bisher beschriebenen Ankerwicklungen gehören zu der Ringwicklung, die besonders dadurch gekennzeichnet ist, dass die Windungen durch den innern Raum des Ankers geführt werden; sie wirken an dieser Stelle nur als Leiter und tragen nichts zur Vergrösserung der elektromotorischen Kraft bei. Man kann jedoch auch die multipolaren Anker mit Trommelwicklung versehen, bei der keine Windung in das Innere der Ankerspule eintritt, da die Verbindungen zwischen den einzelnen Windungen alle an den Enden des Ankers liegen. Diagramme dieser Wicklungsart haben wir für eine zweipolige Maschine in Fig. 18 und 19 mitgetheilt; hieraus ergiebt sich leicht, wie dies System bei multipolaren Maschinen anzuwenden ist. Die Verbindungen zwischen den Enden der einzelnen Ankerspulen umspannen hier nicht die Hälfte, sondern nur ein Viertel oder ein Sechstel des Umfangs, je nachdem das Feld vier oder sechs Pole besitzt; die Windungen können parallel oder hintereinander geschaltet werden, je nachdem man eine grössere Stromstärke oder eine grössere elektromotorische Kraft zu erhalten wünscht.

In dem ersten Falle gelten ohne Weiteres die Formeln, die wir oben für die elektromotorische Kraft angegeben haben, während in dem andern Falle die rechten Seiten von Gleichung (4) und (5) mit einem Faktor zu multipliciren sind, der gleich der Zahl der Polpaare des Feldes ist. Der Faktor ist also z. B. für eine vierpolige Maschine gleich zwei, für eine sechspolige gleich drei u. s. w.

Formel (26) giebt uns an, warum kleine Motoren, wie wir schon zu Beginn des dritten Kapitels bemerkten, oft nicht als Dynamomaschinen zu gebrauchen sind. Der Luftzwischenraum δ kann nämlich bei sehr kleinen Maschinen aus mechanischen Gründen nicht in demselben Verhältnis verkleinert werden, wie die sonstigen linearen Dimensionen, so dass das erste Glied auf der rechten Seite von Gleichung (26) verhältnismässig gross wird, d. h. der magnetische Widerstand des Luftzwischenraums ist gross und erfordert eine entsprechend hohe erregende Kraft, für deren Erzeugung alsdann oft die ganze Leistung des Ankers nicht ausreicht. In diesem Fall kann sich die Maschine nicht selbst erregen. Sie ist aber dann immer noch als Motor verwendbar, für dessen Erregung die Energie von einer äussern Quelle entnommen wird.

Wir haben oben gezeigt, wie die erregende Kraft als Funktion der Feldstärke graphisch dargestellt werden kann (Fig. 56), und da die elektromotorische Kraft bei konstanter Geschwindigkeit der Feldstärke proportional ist, so lässt sich für die Beziehung zwischen Feldstärke und elektromotorischer Kraft eine ähnliche Kurve zeichnen, deren besondere Gestalt natürlich von der Konstruktion der Maschine abhängt, also gleichsam den allgemeinen Charakter der Maschine kennzeichnet. Man bezeichnet deshalb als *Charakteristik* jede Kurve, welche die Abhängigkeit zwischen zwei Variablen einer Maschine darstellt, wenn alle andern Grössen konstant bleiben. Halten wir z. B. die Geschwindigkeit und die Stromstärke des äussern Stromkreises konstant, so können wir die elektromotorische Kraft als Funktion der erregenden Kraft darstellen, oder bei einer Hauptstrommaschine als Funktion der Stromstärke. Bei konstanter Erregung und konstanter Geschwindigkeit lässt sich ferner die Stromstärke als Funktion des äussern Widerstandes betrachten. Das Drehungsmoment eines Motors hängt ausserdem bei konstanter Stromstärke von der erregenden Kraft ab u. s. w.

Aus den charakteristischen Kurven der Maschine kann man, wie wir schon ausführten, den gesammten Induktionsfluss im Anker entnehmen, vorausgesetzt, dass keine andere erregende Kraft als die der Feldmagnete wirkt. Diese Bedingung ist erfüllt, wenn die Feldmagnete besonders erregt werden und kein Strom durch den Anker fliesst. Die elektromotorische Kraft desselben ist in diesem Falle genau gleich der an den Bürsten gemessenen. Wenn ein Strom durch den Anker fliesst, so ist die elektromotorische Kraft, welche wir an den Bürsten messen, entweder kleiner oder grösser als die, welche im Anker erzeugt wird, je nachdem die Maschine als Generator oder als Motor gebraucht wird. Wir haben deshalb drei verschiedene Fälle zu unterscheiden: entweder ist die Maschine stromlos oder sie arbeitet als Dynamomaschine oder sie wird als Motor verwendet. Der erste Fall tritt ein, wenn man den äussern Stromkreis öffnet; aber wir können uns auch denken, dass der äussere Stromkreis geschlossen bleibt und dass eine gleiche, aber entgegengesetzt gerichtete elektromotorische Kraft in den Kreis eingeschaltet wird, welche der im Anker entstehenden elektromotorischen Kraft entgegen wirkt. Es findet alsdann gleichsam statisches Gleichgewicht zwischen der elektromotorischen Kraft des Ankers und der ihr entgegengesetzten statt. Die charakteristische Kurve, die diesem Zustande entspricht, nennen wir daher *statische Charakteristik*. Wird die entgegengesetzte elektromotorische Kraft vermindert, so wird sie der elektromotorischen Kraft des Ankers nicht mehr das Gleichgewicht halten, es entsteht also ein Strom, der Arbeit leisten kann. Die Maschine arbeitet alsdann als Generator, der mechanische Energie aufnimmt und elektrische abgiebt. Eine charakteristische Kurve, welche diese Betriebsart darstellt, nennen wir *dynamische Charakteristik*. Wenn wir anderseits die entgegengesetzte elektromotorische Kraft so weit vergrössern, dass sie der elektromotorischen Kraft des Ankers überlegen ist, so geht ein Strom durch den Anker, der die Maschine als Motor treibt. Eine Charakteristik, welche dieser Betriebsart der Maschine entspricht, nennen wir *motorische Charakteristik*. Aus gewissen Gründen, die wir sogleich anführen werden, muss die dynamische Charakteristik immer kleiner als die statische sein, und dasselbe gilt im allgemeinen für die motorische Charakteristik; aber hier giebt es auch Fälle, wo die motorische über der statischen Kurve liegt. Wenn wir uns gegenwärtig nur auf die Dynamomaschinen beschränken, so ist leicht zu sehen, warum die dynamische Kurve unter der statischen liegen muss. Zuerst ist der Verlust an elektromotorischer Kraft zu berücksichtigen, der von dem elektrischen Widerstand des Ankers herrührt. Dieser Verlust kann natürlich berechnet werden, indem wir die Stromstärke mit dem Widerstand multipliciren. Aber ausserdem findet noch eine weitere Verminderung der elektromotorischen Kraft statt, welche sich folgendermaassen erklären lässt. Haben wir es z. B. mit einer zweipoligen Dynamomaschine zu thun, deren Bürsten genau rechtwinklig zu dem polaren Durchmesser stehen, so wollen wir unsere

Aufmerksamkeit auf die positive Bürste richten, also auf diejenige, an welcher der Strom den Anker verlässt. In allen Spulen, die auf der einen Seite dieser Bürste liegen, fliesst der Strom in derselben Richtung, z. B. an der Aussenseite des Ankers nach dem Kommutator hin, während er in den Spulen auf der andern Seite der Bürste in der entgegengesetzten Richtung fliesst. Es findet also eine Umkehrung des Stromes in jeder Spule statt, wenn diese die Bürste passirt. Während sie sich unter der Bürste befindet, ist sie kurz geschlossen, aber da sie im Moment vorher von der Hälfte des ganzen Ankerstroms durchlaufen wird, muss in Folge der Selbstinduktion noch ein Strom durch die kurzgeschlossene Spule fliessen. Dieser wird wegen des Widerstandes der Spule allmählich schwächer und nimmt bis auf Null ab, kann jedoch offenbar nicht umgekehrt werden. Aber sobald die Spule die Bürste verlässt, so wird in demselben Augenblick die Hälfte des ganzen Ankerstroms in entgegengesetzter Richtung hindurchgetrieben. Es entsteht deshalb ein heftiger Funken, welcher leicht dadurch vermieden werden kann, dass man die Bürste ein Stück vorwärts schiebt. Alsdann schneidet die Spule, während sie die Bürste passirt, Kraftlinien, welche in ihr eine elektromotorische Kraft induciren, die dem Strome entgegenwirkt und ihn schnell vernichtet. Aber diese Kraftlinien leisten noch mehr: sie rufen einen Strom in entgegengesetzter Richtung hervor, so dass der Strom in der Spule im Moment, wo sie die Bürste passirt, schon in derselben Richtung fliesst, wie später. Auf diese Weise vollzieht sich der Uebergang der Spule von der Stellung unter der Bürste, wo sie kurz geschlossen ist, zu der Stellung jenseits der Bürste, wo sie wieder in Wirkung tritt, ganz allmählich und ohne Funkenbildung. Durch das Vorschieben der Bürste haben wir den Funken vermieden, aber auch einige Kraftlinien aufgeopfert, die sonst die elektromotorische Kraft des Ankers vergrössert hätten und die in der That ausgenutzt werden, wenn die Maschine bei offenem Stromkreis läuft.

Es treten also mehr Kraftlinien in Wirkung, wenn die Maschine statisch, als wenn sie dynamisch arbeitet; die dynamische elektromotorische Kraft ist also niedriger als die statische.

Eine weitere Verkleinerung der elektromotorischen Kraft rührt davon her, dass der Anker selbst durch den in ihm verlaufenden Strom magnetisirt wird und sodann eine Rückwirkung auf die Feldmagnete ausübt. Wenn es möglich wäre, die Bürsten beim Betriebe auf den neutralen Durchmesser zu stellen, so würden die Pole des

Ankers genau in der Mitte zwischen den Hauptpolen der Feldmagnete entstehen und würden diese weder verstärken, noch schwächen. Aber die Bürsten müssen aus dem schon angegebenen Grunde nach vorwärts gerückt werden, und deshalb kommen der Anker und die Feldmagnete mit gleichen Polen näher zusammen; in Folge dessen wird das Hauptfeld etwas geschwächt und damit auch die elektromotorische Kraft. In Wirklichkeit ist die Erscheinung, die wir hier nur kurz andeuten und die man gewöhnlich als *Rückwirkung des Ankers* bezeichnet, nicht so einfach, aber es würde den Rahmen dieses Buches überschreiten, genauer darauf einzugehen. Zudem ist die gesammte Rückwirkung des Ankers bei guten Dynamomaschinen sehr klein und oft geringer als 5 % der ganzen elektromotorischen

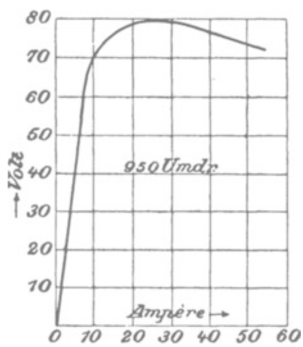


Fig. 58.

Kraft. Bei schlecht konstruirten Maschinen kann sie grösser werden, wie man aus Fig. 58 sieht, welche die innere Charakteristik einer Gramme'schen Dynamomaschine nach der Untersuchung von Marcel Deprez darstellt.

Das Verhalten der Dynamomaschine lässt sich am besten an solchen Maschinen untersuchen, welche besonders erregt werden. Esson hat sehr sorgfältige Versuche hierüber angestellt, welche in „Electrical Review", April 1884, veröffentlicht sind. Die untersuchte Maschine war eine vom Phönix-Typus mit Pacinotti'schem Anker. Sie wurde besonders erregt und lief mit einer konstanten Geschwindigkeit von 1600 Umdrehungen in der Minute. Der Strom, welcher durch den Anker ging, wurde mittelst eines Rheostaten variirt. Die Gerade E (Fig. 59) stellt die innere elektromotorische Kraft dar, welche der konstanten erregenden Kraft entspricht, wenn keine Rückwirkung vorhanden wäre. Die Gerade E_b stellt die Klemmenspannung der Maschine dar, wenn keine Rückwirkung auftritt, und die Linie E_{b_1} giebt die wirklich beobachteten Werthe. Der Unterschied der Ordinaten von E_b und E_{b_1} entspricht dem Verlust an elektromotorischer Kraft, der von der Selbstinduktion, sowie von der Schwächung und Verschiebung des Feldes herrührt.

Die Rückwirkung des Ankers verhält sich beim Motor ähnlich wie bei der Dynamomaschine, nur muss der Spannungsverlust in Folge des innern Widerstandes zu der innern elektromotorischen Kraft des Ankers addirt, statt wie vorher von ihr subtrahirt werden. Wenn die Maschine rationell gebaut ist, so existirt nur ein geringer Unter-

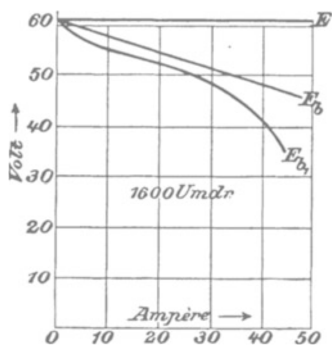


Fig. 59.

schied zwischen der dynamischen und motorischen Charakteristik, die beide unter der statischen liegen. Ist die Maschine aber nicht für einen hohen Wirkungsgrad konstruirt, so kann es vorkommen, dass die motorische Kurve bedeutend höher liegt als die dynamische und selbst die statische. Der Grund hierfür ist klar. Wenn ein merkbarer Energiebetrag in Folge von Wirbelströmen oder Hysteresis verloren geht, so muss dieser von dem Motorstrom in Form von höherer Klemmenspannung zugeführt werden. Nun finden wir aber die motorische Charakteristik der elektromotorischen Kraft aus der Spannung an den Bürsten und dem Widerstand des Ankers. Da letzterer konstant ist, so ist auch die elektromotorische Kraft des Motors um so höher, je höher die Klemmenspannung an den Bürsten steigt. Der Verfasser hat diese Schlussfolgerungen durch Messungen an einer Bürgin'schen Maschine bestätigt, welche er als Dynamomaschine und als Motor untersuchte. Wie zu erwarten war, lag die dynamische Kurve unter der statischen, aber die motorische lag über derselben. Der Grund hierfür ist wahrscheinlich der, dass wegen der sechseckigen Form des Ankers die Entfernung zwischen diesem und der Oberfläche der Polschuhe andauernd wechselt. Hierdurch wird ein Energiebetrag absorbirt, der eine Vergrösserung der elektromotorischen Kraft des treibenden Stromes nöthig macht; es macht dies den Eindruck, als ob die elektromotorische Gegenkraft im Anker höher wäre, als sie in der That ist. Weil manche Maschinen eine hohe elektromotorische Gegenkraft besitzen, so haben einige Forscher, besonders Ayrton und Perry, eine Theorie der Elektromotoren aufgestellt, nach welcher der Anker die Feldstärke vergrössert, während er sie in Wirklichkeit schwächt, und man empfahl, Motoren mit kleinen Feldmagneten und grossen Ankern zu bauen. Die Erfahrung hat jedoch diese Theorie widerlegt, und die besten Motoren werden heute nach denselben Principien gebaut, wie sie für die besten Dynamomaschinen gelten.

Wir gehen nun dazu über, den Gebrauch und die Bedeutung der charakteristischen Kurven auseinanderzusetzen.

Fig. 60 zeigt die innere und äussere Charakteristik einer Siemens'schen Hauptstrommaschine, an der Hopkinson Versuche angestellt hat (Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers 1879). Die punktirte Kurve OE_k stellt die Klemmenspannung der Maschine dar und die ausgezogene Linie OE_a die elektromotorische Kraft des Ankers. Die letztere erhält man aus der erstern, indem man zu ihren Ordinaten den innern Spannungsverlust addirt. Dieser ist gleich dem Produkt aus Stromstärke und innerm Widerstand, der bei der Maschine gleich 0,6 Ohm war. Deshalb ist der Verlust bei der Stromstärke von 50 A gleich 30 V, und man sieht aus der Figur, dass der Unterschied der beiden Ordinaten, welche der Abscisse 50 entsprechen, gleich 30 ist. Wir können auch den Spannungsverlust durch eine Charakteristik darstellen, und da er immer der Stromstärke proportional ist, wird diese eine Gerade Or. Die trigonometrische Tangente des Winkels, den diese Linie mit der Abscissenachse einschliesst, ist offenbar gleich dem innern Widerstand der Maschine. Die Ordinaten zwischen Or und OE_a stellen die äussere elektromotorische Kraft dar; folglich wird die innere Charakteristik OE_a die äussere, wenn wir Or statt der horizontalen Achse als Grundlinie annehmen.

Nach einer anschaulichen Methode, welche von Silvanus P. Thompson herrührt, können diese Charakteristiken auch angeben, welche Anzahl von Pferdestärken irgend einem Produkt von Stromstärke und elektromotorischer Kraft entspricht. Wie wir schon gezeigt haben, ist die Anzahl der Pferdestärken, welche ein Strom i bei der elektromotorischen Kraft E_a darstellt, gleich $\frac{i\,E_a}{736}$. Eine

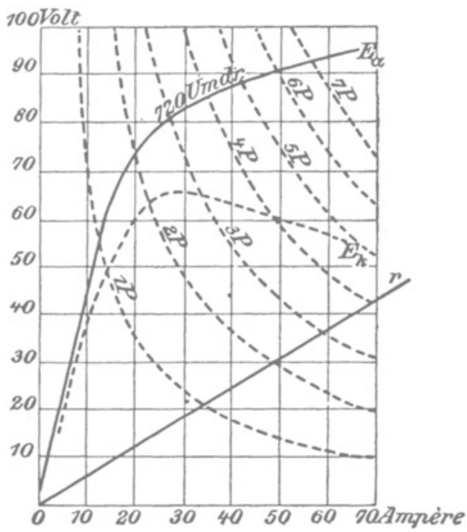


Fig. 60.

Pferdestärke kann durch eine unendliche Mannigfaltigkeit von Werthen der Grössen i und E_a dargestellt werden, die aber alle der Gleichung

$$736 = i\,E_a$$

genügen müssen. Eine Kurve, welche eine Pferdestärke darstellt, geht durch alle Punkte, für welche das Produkt der Koordinaten konstant und gleich 736 ist. Auf ähnliche Weise erhalten wir Kurven für jede Anzahl von Pferdestärken. Es sind gleichseitige Hyperbeln, deren Asymptoten die Koordinatenachsen sind. Wenn wir eine Anzahl solcher Kurven in das Diagramm (Fig. 60) einzeichnen, so können wir auf den ersten Blick erkennen, wieviel Pferdestärken jedem Punkt der Charakteristik entsprechen. So stellt ein Strom von 30 A ungefähr 3,35 P an innerer und ungefähr 2,7 P an äusserer elektrischer Energie dar. Ein Strom von 50 A stellt etwas über 6 P an innerer und etwas mehr als 4 P an äusserer Energie dar u. s. w.

Bei einer Dynamomaschine liegt die innere Charakteristik immer über der äussern. Bei einem Motor ist jedoch ihre gegenseitige Stellung umgekehrt, da die äussere elektromotorische Kraft nothwendig grösser ist als die elektromotorische Gegenkraft der Ankerspulen. Fig. 61 zeigt die charakteristischen Kurven einer Siemens'schen Dynamomaschine, welche wir oben als Motor behandelten. Um das Diagramm nicht zu weit auszudehnen, ist die Geschwindigkeit auf 500 Umdrehungen ermässigt. Die Kurve OE_a stellt die elektromotorische Gegenkraft dar, welche in der Ankerwicklung entsteht, und die punktirte Kurve OE_k bedeutet die Klemmenspannung. Der Unterschied der Ordinaten beider Kurven stellt die elektromotorische Kraft dar, welche nöthig ist, um den innern Widerstand der Maschine zu überwinden. Wenn wir die Gerade Or unter einem solchen Winkel ziehen, dass die Tangente desselben dem innern Widerstande gleich ist, aber diesmal nicht über, sondern unterhalb der Abscissenachse, so können wir sie als die neue Grundlinie betrachten, von wo aus die Ordinaten der äussern Charakteristik OE_a gerechnet werden.

In dem Diagramm (Fig. 61) ist angenommen, dass wir auf irgend eine Weise die Geschwindigkeit auf 500 Umdrehungen in der Minute konstant erhalten können. Diese Bedingung lässt sich leicht bei einer Dynamomaschine erfüllen, bietet aber bedeutende Schwierigkeiten, wenn wir es mit einem Hauptstrommotor zu thun haben, weil seine Geschwindigkeit von einer Anzahl Faktoren abhängt, die in gewissem Grade von einander unabhängig sind. Die Geschwindigkeit hängt von der Stromstärke und der elektromotorischen Kraft der Stromquelle ab, ferner noch von dem Betrage der mechanischen Arbeit, die zu leisten ist. In einigen Fällen hängt die Arbeit, d. h. das Produkt von Drehungsmoment und Geschwindigkeit, selbst wieder von der letztern ab; man sieht, dass die Beziehung zwischen diesen verschiedenen Grössen von ziemlich komplicirter Natur ist. Die Abhängigkeit der verschiedenen Grössen von einander lässt sich jedoch leicht durch die *Geschwindigkeitscharakteristik* darstellen, wie es vom Verfasser zuerst geschehen ist (Electrician, 29. Dec. 1883). Wir wollen annehmen, dass die äussere elektromotorische Kraft einen bestimmten und konstanten Werth hat, und nun untersuchen, wie Geschwindigkeit, Leistung und Wirkungsgrad beispielsweise bei einem

8*

Hauptstrommotor von einander abhängen. Da E_k für alle Stromstärken konstant ist, so haben wir praktisch eine unerschöpfliche Stromquelle, wie sie die Kabel einer Centrale darstellen. Die Stärke des Stromes, der durch den Motor fliesst, hängt von dessen Wider-

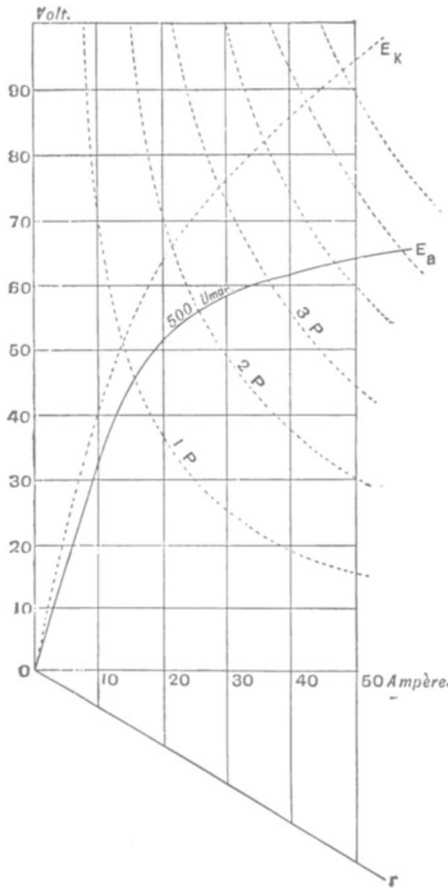


Fig. 61.

stande und elektromotorischer Gegenkraft ab. Der erstere ist konstant, während die letztere mit der Geschwindigkeit wächst. Je schneller wir den Motor laufen lassen, um so weniger Strom fliesst hindurch und um so geringer ist die Effektaufnahme. Es mögen in

Fig. 62 die Geschwindigkeiten als Abscissen aufgetragen werden und die elektrischen Pferdestärken als Ordinaten, alsdann erhalten wir bei einem Hauptstrommotor die Kurve *WW*. Die genaue Form derselben hängt natürlich von der Konstruktion des Motors ab, aber ihr allgemeiner Charakter ist der in Fig. 62 gezeichnete. Am leichtesten lässt sich die Kurve experimentell in der Weise bestimmen, dass man an dem Motor einen Bremszaum anbringt und diesen mit verschiedenen Gewichten belastet, so dass man verschiedene Geschwindigkeiten erhält. Die von dem Zaum absorbirten Pferdestärken sind die Ordinaten der Kurve *ww*. Wenn wir mit einer so grossen Belastung des Zaums beginnen, dass der Motor stillsteht, so wird das Maximum an elektrischer Energie absorbirt,

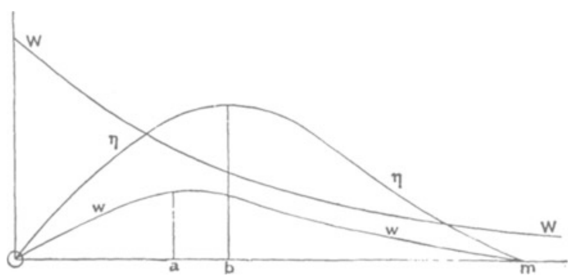


Fig. 62.

ohne dass äussere Arbeit geleistet wird. Entlasten wir anderseits den Motor vollständig, so erhalten wir die maximale Geschwindigkeit *Om*, und es wird wiederum keine äussere Arbeit geleistet; in diesem Falle geht jedoch nur ein sehr geringer Strom durch den Motor, und die absorbirte Energie ist ein Minimum. Zwischen diesen beiden äussersten Grenzen der geringsten und grössten Geschwindigkeit wird äussere Arbeit geleistet, und es giebt eine besondere Geschwindigkeit *Oa*, für welche die Arbeit ein Maximum ist. Das Verhältnis der Ordinaten von *W* und *w* kann in einer Kurve $\eta\eta$ dargestellt werden, die, in beliebigem Maassstabe gezeichnet, den Wirkungsgrad des Motors als Funktion der Geschwindigkeit angiebt. Für eine specielle Geschwindigkeit *Ob* ist dieser Wirkungsgrad ein Maximum, aber dies braucht nicht nothwendig dieselbe Geschwindigkeit zu sein, für welche die Leistung ein Maximum ist. In der Regel ist sie bedeutend grösser, und im wirklichen Betriebe sollte der Motor so regulirt sein, dass er annähernd mit der Geschwindigkeit läuft, für die der Wirkungsgrad ein Maximum ist.

Die experimentelle Bestimmung dieser Geschwindigkeit erfordert, wie wir oben erwähnten, ein Dynamometer. Ist ein solches nicht vorhanden, so kann man eine andere Methode benutzen, die freilich nicht so genau ist, wie die vorhergehende.

Die Aufgabe besteht darin, die Beziehung zwischen Geschwindigkeit und Stromstärke bei einem gegebenen Hauptstrommotor zu finden, wenn diesem ein Strom aus einer Quelle konstanter elektromotorischer Kraft zugeführt wird. Die Lösung ist möglich, wenn wir den innern Widerstand und die innere Charakteristik des Motors kennen. Haben wir die Beziehung zwischen Geschwindigkeit und Stromstärke erhalten, so können wir das Diagramm der Fig. 62 konstruiren, wenn wir für den Wirkungsgrad der Umsetzung eine passende Annahme machen. Wir setzen voraus, dass der Motor aus zwei Kabeln gespeist wird, an deren Klemmen eine konstante Potentialdifferenz von 100 V herrscht. Es möge in Fig. 63 OE_a die innere Charakteristik für eine konstante Geschwindigkeit, z. B. von 500 Umdrehungen, sein, und es möge die Gerade r einen solchen Winkel mit der horizontalen Achse einschliessen, dass dessen trigonometrische Tangente gleich dem innern Widerstande des Motors in Ohm ist; alsdann stellen die Ordinaten der Linie r die elektromotorischen Gegenkräfte dar, die in der Wicklung des Ankers herrschen müssen, damit ein gegebener Strom hindurchfliesst. So ist z. B. die elektromotorische Gegenkraft für 100 A gleich 40 V. Wenn der Anker 500 Umdrehungen in der Minute macht, so sehen wir aus der Charakteristik, dass seine elektromotorische Gegenkraft gleich 68 V ist, und um sie auf 40 V herabzusetzen, so dass ein Strom von 100 A hindurchgeht, muss die Geschwindigkeit im Verhältnis von 68 zu 40 verkleinert werden. Einem Strom von 100 A entsprechen daher $500 \frac{40}{68} = 294$ Umdrehungen. Aehnliche Berechnungen lassen sich für andere Werthe der Stromstärke anstellen, und die Werthe, die man für die Geschwindigkeit erhält, werden, wie Fig. 63 zeigt, in einer Kurve aufgetragen, die unterhalb der Abscissenachse verläuft. Bei 166 A ist die Geschwindigkeit Null, weil die gesammte elektromotorische Kraft von 100 V dazu erforderlich ist, den innern Widerstand des Motors zu überwinden, und nichts für die Ueberwindung einer elektromotorischen Gegenkraft übrig bleibt.

Bei 16 A beträgt die Geschwindigkeit 1000 Umdrehungen, und für kleinere Stromstärken ist die Geschwindigkeit noch grösser. Theoretisch betrachtet, sollte sie unendlich gross sein, wenn kein Strom hindurchfliesst. Dies würde auch der Fall sein, wenn der Motor gar keine Arbeit leistete. Diese Bedingung ist aber natürlich unmöglich, und der Geschwindigkeit ist schon dadurch eine Grenze gesetzt, dass Energie aufgewendet werden muss, um die mechanische und magnetische Reibung zu überwinden. Bei guten Motoren mit

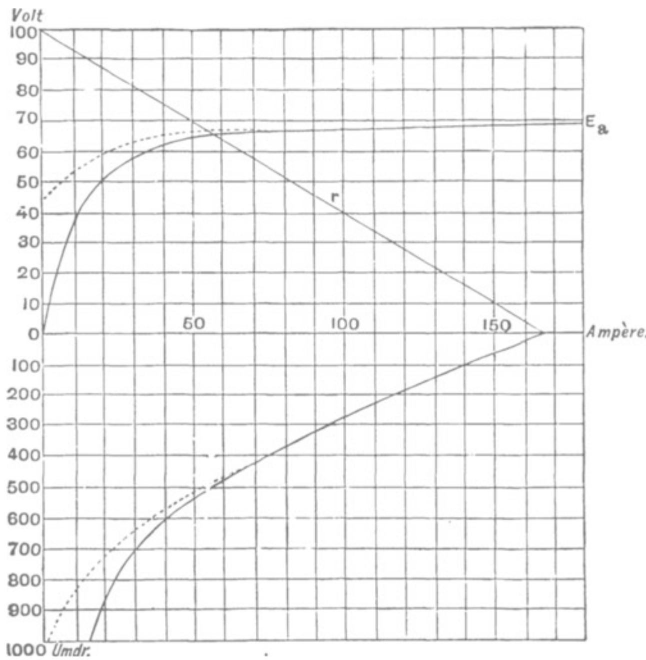


Fig. 63.

geringer Lagerreibung ist indessen die Geschwindigkeit beim Leerlauf ausserordentlich hoch und wirkt in vielen Fällen nachtheilig, besonders wenn die Motoren Drehbänke und andere Werkzeugmaschinen treiben sollen, die einen variabeln Widerstand besitzen.

Das Beispiel, welches in Fig. 63 dargestellt ist, findet auch Anwendung auf den Fall, wo ein Hauptstrommotor von einer Akkumulatoren-Batterie gespeist wird, die einen sehr geringen innern Widerstand hat, so dass die elektromotorische Kraft alsdann annähernd für alle Stromstärken konstant ist. Um den Unterschied in der Geschwindigkeit zu verringern, verwendet man alsdann gewöhnlich einen Rheostaten oder variabeln Widerstand, der in den Stromkreis zwischen die Batterie und den Motor eingeschaltet wird. Das Maximum des Widerstandes wird eingeschaltet, wenn der Motor leer läuft, und mit wachsender Belastung wird Widerstand ausgeschaltet, um die Geschwindigkeit zu reguliren. Im günstigsten Fall bleibt dies aber immer ein unzweckmässiger Apparat, welcher der persönlichen Wartung bedarf und Aenderungen in der Geschwindigkeit doch nie ganz ausschliessen kann. Er ist auch nicht sparsam, da durch die im Widerstand erzeugte Wärme Energie verloren geht. Besser ist es, die Feldmagnete mit gemischter Wicklung zu versehen, bei welcher der Haupt- und Nebenschlussstrom die Feldmagnete im selben Sinne magnetisirt. Hierdurch wird der erste Theil der Charakteristik gehoben und die Geschwindigkeit vermindert, wie die punktirten Linien in Fig. 63 angeben. Diese Methode ist freilich kein vollständiges Heilmittel für das Uebel, sie ist aber eine Linderung, welche in der Praxis oft sehr werthvoll ist. Um den Motor so einzurichten, dass er sich selbst regulirt, müsste die Hauptstromwicklung der Feldmagnete der Nebenschlusswicklung entgegenwirken; alsdann ginge aber eine werthvolle Eigenschaft des Hauptstrommotors, nämlich seine grosse Kraft beim Angehen, verloren. Denn wenn ein Motor z. B. für eine Strassenbahn verwendet wird, so ist es sehr wichtig, dass er im Anfang beim Anziehen eine grosse Kraft besitzt. Diese Bedingung wird in vorzüglicher Weise von dem gewöhnlichen Hauptstrommotor erfüllt, wo sowohl die Strom-, wie die Feldstärke und das statische Drehungsmoment am grössten sind, wenn der Motor still steht, und wo diese Grössen abnehmen, wenn der Motor zu laufen beginnt. Man erhält auf diese Weise eine Selbstregulirung zwischen Geschwindigkeit, Leistung und Widerstand. Wir wollen z. B. einen elektrischen Strassenbahnwagen betrachten, der von Akkumulatoren getrieben wird. Bei grosser Steigung oder schlechter Fahrbahn ist die Geschwindigkeit gering, es geht also ein starker Strom durch den Motor, welcher ihm die nöthige Zugkraft verleiht; auf guter ebener Bahn wächst die Geschwindigkeit, es geht weniger Strom durch den Motor, und es wird nur eine geringe Zugkraft ausgeübt.

Fünftes Kapitel.

Graphische Behandlung der Probleme. — Maximale äussere Energie. — Maximaler theoretischer Wirkungsgrad. — Bestimmung der günstigsten Geschwindigkeit für den maximalen wirthschaftlichen Wirkungsgrad. — Aenderung der Geschwindigkeit bei Nebenschlussmotoren. — Die Kompoundmaschine als Generator. — Kraftübertragung bei konstanter Geschwindigkeit. — Praktische Schwierigkeiten.

Die Lösungen der Aufgaben, welche die elektrische Kraftübertragung stellt, werden durch den Gebrauch der charakteristischen Kurven sehr vereinfacht. Hierzu kommen noch andere graphische Methoden, von denen wir eine erwähnen wollen, die von Silvanus Thompson herrührt. Die Aufgabe lautet folgendermaassen: Es möge in Fig. 64 das Quadrat $ABCD$ so konstruirt sein, dass seine Seitenlänge die elektromotorische Kraft E der Stromquelle darstellt, welche den Motor speist, und die elektromotorische Gegenkraft e werde durch die Strecke $AF = AG$ dargestellt. Wir ziehen die Linien FK und GH, welche AB, bezw. AC parallel sind. Die Energie, welche dem Motor zugeführt wird, ist gleich dem Produkt aus der elektromotorischen Kraft E und der Stromstärke J, während die in mechanische Arbeit umgesetzte Energie gleich dem Produkt der elektromotorischen Gegenkraft e und der Stromstärke J ist. Es möge W den gesammten Widerstand des Stromkreises bedeuten; alsdann ist

$$J = \frac{E - e}{W} = \frac{\overline{FC}}{W}.$$

Die dem Motor zugeführte Energie ist offenbar

$$\frac{E(E - e)}{W},$$

die im Motor umgesetzte

$$\frac{e(E - e)}{W}.$$

Nun ist der Flächeninhalt des Rechtecks $FKCD = E(E-e)$ und der Flächeninhalt des Rechtecks $GBKL = e(E-e)$; und da W konstant ist, so sind diese Flächeninhalte — in der Figur sind sie schraffirt — der zugeführten und umgesetzten Energie proportional.

Das Thompson'sche Diagramm kann sogleich dazu verwendet werden, um auf graphischem Wege zwei Aufgaben zu lösen, welche analytisch schon im ersten Kapitel (S. 38) behandelt sind. Es sind die folgenden: Unter welchen Umständen ist die vom Motor abgegebene Energie ein Maximum? und sodann unter welchen Umständen erreicht der Wirkungsgrad sein Maximum?

Die Antwort auf die erste Frage ergiebt sich leicht, wenn wir Fig. 64 betrachten. Da das Rechteck $GBKL$, welches die Energie des Motors darstellt, zwischen der Diagonale AD und den Seiten AB und DB liegt, so kommt die Aufgabe darauf hinaus, zu be-

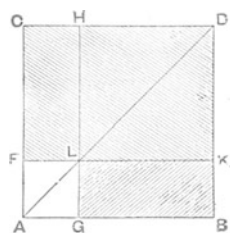


Fig. 64.

stimmen, welches Rechteck von allen, die zwichen diesen Linien liegen können, das Maximum des Flächeninhalts hat. Es ist dies offenbar ein Quadrat, dessen Seiten halb so lang sind als die des äussern Quadrats. In diesem Falle ist die aufgewendete Energie gleich dem Flächeninhalt eines Rechtecks, das halb so gross ist wie das äussere Quadrat; der Wirkungsgrad ist deshalb gleich 50 %.

Wir haben alsdann

$$\text{Aufgewendete Energie} = \frac{1}{W}\,\frac{E^2}{2}$$

$$\text{Gewonnene Energie} = \frac{1}{W}\,\frac{E^2}{4}$$

$$\text{Wirkungsgrad} \qquad \eta = 0{,}50.$$

Was die zweite Aufgabe anbelangt, so ist leicht zu sehen, dass der Unterschied in dem Flächeninhalt der beiden Rechtecke (Fig. 64) um so grösser ist, je näher der Punkt L an A heranrückt, oder mit andern Worten, je kleiner die elektromotorische Gegenkraft ist. In demselben Maasse, als die letztere wächst, rückt der Punkt L nach D, und die Flächeninhalte der beiden Rechtecke werden immer mehr und mehr gleich. Der Wirkungsgrad nähert sich also der Einheit, wenn sich die elektromotorische Gegenkraft des Motors der elektromotorischen Kraft der Stromquelle nähert, die den Motor speist. In diesem Falle wird die Stromstärke sehr klein und ebenso die aufgewendete und gewonnene Energie. Nun ist die im Motor umgesetzte Energie nicht ganz in Form von äusserer mechanischer Energie verwendbar, und es kann hier der Fall eintreten, dass nach Ueberwindung der mechanischen und magnetischen Reibung nichts für Nutzarbeit übrig bleibt. Der wirthschaftliche Wirkungsgrad würde alsdann gleich Null sein, obgleich der theoretische ein Maximum ist.

Wir wollen die Sache noch auf andere Weise klar machen: ein gewisses Minimum der Stromstärke ist erforderlich, um die Reibung des Motors zu überwinden, ganz abgesehen von irgend einem äussern Widerstande. Es ist jedoch gezeigt worden, dass das Drehungsmoment des Motors bei konstantem Feld allein vom Ankerstrom und nicht von der Geschwindigkeit abhängt. Wir können dies Gesetz als annähernd richtig auf den vorliegenden Fall anwenden und annehmen, dass die Stromstärke γ, die erforderlich ist, um die innere Reibung zu überwinden, für jede Geschwindigkeit konstant ist. Alsdann ist

$$\frac{E-e}{W}-\gamma$$

die Stärke des Stromes, der Nutzarbeit leistet, und der wirthschaftliche Wirkungsgrad ist

$$\eta=\frac{e}{E}\,\frac{\frac{E-e}{W}-\gamma}{\frac{E-e}{W}}$$

oder

$$\eta=\frac{E\,e-e^2-e\,W\gamma}{E^2-Ee}.$$

Um die Bedingung zu finden, unter welcher η ein Maximum wird, setzen wir $\frac{d\eta}{de}=0$ und erhalten

$$(E-e)^2=E\,W\gamma. \quad \ldots\ldots\ldots \quad (29)$$

Diese Formel lässt sich graphisch darstellen. Es möge in Fig. 65 OA die Stromstärke bedeuten, bei der sich der Motor nahezu mit normaler Geschwindigkeit ohne äussere Arbeitsleistung dreht, und OH die elektromotorische Kraft E der Elektricitätsquelle, die für alle Bedingungen konstant sein soll. Es würde dies praktisch der Fall sein, wenn die Stromquelle eine selbstregulirende Dynamomaschine oder eine Akkumulatorenbatterie von sehr geringem innern Widerstande wäre. Der Flächeninhalt des Rechtecks $OAGH$ stellt die Leistung dar, welche aufzuwenden ist, damit der Motor mit normaler Geschwindigkeit läuft, wenn keine äussere Arbeit geleistet wird. Hat der Motor Nebenschluss- oder gemischte Wicklung für konstante Geschwindigkeit, so ändert sich seine Feldstärke nicht erheblich, wenn äussere Arbeit geleistet wird, und der Flächeninhalt des Recht-

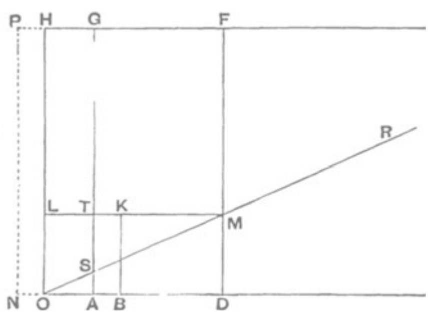


Fig. 65.

ecks $OAGH$ stellt annähernd den innern Energieverlust des Motors für alle Bedingungen dar. Wir ziehen nun die Gerade OR so, dass die trigonometrische Tangente des Winkels, den sie mit der Abscissenachse einschliesst, gleich dem gesammten elektrischen Widerstande des Motors ist. Die Linie SA stellt alsdann den Verlust an elektromotorischer Kraft dar, welcher der Stromstärke OA entspricht, und MD ist der Verlust, welcher der Stromstärke OD entspricht u. s. w. Wir verlängern ferner OD über O hinaus um die Strecke SA bis N und vervollständigen das Rechteck $ONPH$ (dessen Seiten in der Figur punktirt sind). Der Flächeninhalt dieses Rechtecks ist offenbar gleich $E\,W\gamma$ und nach Gleichung (29) gleich $(E-e)^2$. In Folge dessen arbeitet der Motor, wenn wir ihn so belasten, dass seine elektromotorische Gegenkraft $e = HL$ ist, mit dem maximalen wirthschaftlichen Wirkungsgrad. Die an der Motorwelle verfügbare

Energie wird durch den Flächeninhalt des Rechtecks *GFMT* dargestellt; die von der Elektricitätsquelle aufgewendete Energie ist gleich dem Flächeninhalt des Rechtecks *ODFH*, und das Verhältnis beider ist der wirthschaftliche Wirkungsgrad.

Im vorhergehenden Kapitel haben wir gezeigt, dass man mittels eines Dynamometers die Geschwindigkeit für den wirthschaftlichen Wirkungsgrad experimentell bestimmen kann; ferner sahen wir, dass diese Bestimmung bei einem Hauptstrommotor selbst ohne Dynamometer mit ziemlicher Annäherung ausgeführt werden kann. Wir können nun die eben gefundenen Beziehungen dazu verwenden, um diese Bestimmung auch bei Motoren mit Nebenschluss- oder gemischter Wicklung ohne Dynamometer auszuführen. Es möge dies an einem einfachen Beispiel erklärt werden. Eine Dynamomaschine des Verfassers (mit Nebenschlusswicklung und für 60 Glühlampen) wurde als Motor verwendet. Die elektromotorische Kraft der Stromquelle, welche eine Dynamomaschine mit gemischter Wicklung bildete, war gleich 100 V; die Stärke des Stromes, der durch den leer laufenden Motor floss, betrug 4 A, die Geschwindigkeit 1100 Umdrehungen in der Minute und der Widerstand der Leitung und des Ankers 0,2 Ohm. Wir haben also $W\gamma = 0{,}8$ und $\sqrt{EW\gamma} = \sqrt{80} = 8{,}94$.

Um den höchsten Wirkungsgrad zu erhalten, muss der Motor mit solcher Geschwindigkeit laufen, dass seine elektromotorische Gegenkraft $e = 100 - 8{,}94 = 91$ V ist.

Wenn er leer läuft, so ist die elektromotorische Gegenkraft gleich $100 - 0{,}8 = 99{,}2$ V. Die günstigste Geschwindigkeit ist also

$$1100 \frac{91}{99{,}2} = 1010 \text{ Umdrehungen.}$$

Der Strom, welcher bei dieser Geschwindigkeit durch den Motor fliesst, hat eine Stärke von 45 A, wovon 4 A nöthig sind, um die innere Reibung zu überwinden, und 41 A für Nutzarbeit übrig bleiben. Wenn der Motor auf die Geschwindigkeit von 1010 Umdrehungen in der Minute regulirt wird, so erhalten wir demnach an der Welle

$$\frac{41 \times 91}{736} = 5{,}07 \text{ P.}$$

Aber es ist nicht immer möglich, den Motor genau bei der richtigen Geschwindigkeit laufen zu lassen, besonders wenn die Belastung wechselt. In diesem Fall ist es wichtig zu wissen, um wieviel man diese Geschwindigkeit variiren kann, ohne den Wirkungsgrad zu sehr zu schwächen. Für den erwähnten Motor finden wir folgende Zahlen:

1010 Umdr.;	5,07 P;	$e = 91$ V;	$i = 45$ A;	Wirkungsgrad	$= 82,8$ %
1065	2,07	$e = 96$	$i = 20$	-	$= 76,7$ %
944	8,20	$e = 85$	$i = 75$	-	$= 80,0$ %.

Aus dieser Tabelle ersieht man, dass sich ein Nebenschlussmotor ziemlich selbst regulirt, da der Unterschied der Geschwindigkeit bei Leerlauf und voller Belastung in dem vorliegenden Beispiel nur 15 % beträgt. Es ist hierbei zu bemerken, dass der Motor für einen Arbeitsstrom von 45 A gebaut war und bei fortdauerndem Betriebe mit nicht mehr als 5 P belastet werden sollte. Dies reducirt die grösste Aenderung in der Geschwindigkeit auf etwas weniger als 9 %. Um den Einfluss des Ankerwiderstandes auf die normale Geschwindigkeit und auf den Wirkungsgrad zu zeigen, fügen wir eine Tabelle hinzu, die für denselben Motor und dieselbe elektromotorische Kraft berechnet ist; der Widerstand des Ankers war jedoch durch Einschaltung eines künstlichen Widerstandes von 0,3 Ohm auf 0,5 Ohm erhöht.

950 Umdr.;	2,82 P;	$e = 86$ V;	$i = 28$ A;	Wirkungsgrad	$= 73,5$ %
860	4,30	$e = 77$	$i = 45$	-	$= 70,5$ %
1000	1,96	$e = 90$	$i = 20$	-	$= 72,0$ %.

In der Praxis würde der Zusatzwiderstand nicht in den Stromkreis des Ankers geschaltet werden, sondern in die Leitung, wo er freilich bei Kraftübertragungen auf bedeutende Entfernung nicht zu vermeiden ist. Dadurch, dass wir den Widerstand in den Stromkreis des Ankers einschalten, haben wir die Bedingung, unter der allein die Formel (29) gilt, nicht geändert. Diese bestand darin, dass die Feldstärke für alle Stromstärken und Geschwindigkeiten dieselbe ist; sie wird selbst im Falle der Kraftübertragung auf bedeutende Entfernung erfüllt, wenn wir die Feldmagnete des Motors besonders erregen und den Strom dafür durch ein besonderes Kabel von der entfernten Elektricitätsquelle herleiten. Aber in der Praxis würde eine solche Anordnung zu verwickelt sein, und zudem hätte sie, wie wir sogleich sehen werden, in Bezug auf die Konstanz der Geschwindigkeit keinen Vortheil gegenüber der einfachen Anordnung, wo man den Strom für die Erregung des Nebenschlussmotors direkt aus der Leitung des Arbeitsstromes nimmt. Bei einer konstanten Feldstärke würde dies natürlich die Geschwindigkeit des Motors erniedrigen, aber wenn die Feldmagnete desselben nicht bis zur Sättigung magnetisirt sind, so bewirkt die Abnahme der Klemmenspannung des Motors eine Abnahme der Feldstärke. Da in Folge dessen mehr Strom durch den Anker geht, steigt sein Drehungsmoment und seine Geschwindigkeit, bis dass die elektromotorische Gegenkraft wieder der kleinern elektromotorischen Kraft der Quelle das Gleichgewicht hält. Die Aenderung der Geschwindigkeit ist deshalb kleiner, als sie auf den ersten Blick erscheint. Aber eine kurze Ueberlegung zeigt, dass der Gewinn an Geschwindigkeit, welchen die Zunahme des Ankerstroms bewirkt, nie ganz die Abnahme der Geschwindigkeit ausgleichen kann, die von der Abnahme der elektromotorischen Kraft herrührt. Deshalb kann sich ein reiner Nebenschlussmotor, wenn er von einer Quelle konstanter elektromotorischer Kraft gespeist wird, nie selbst reguliren. Er muss schneller laufen, wenn die Belastung gering ist, und langsamer, wenn mehr Arbeit geleistet wird. Dasselbe ist in noch höherm Grade bei dem Hauptstrommotor der Fall. Der Nebenschlussmotor ist hier immer noch vorzuziehen, wie wir aus obiger Tabelle (S. 126) sehen. Dagegen hat dieser aber keine Kraft beim Angehen, da sein Anker, wenn er still steht, einen kurz geschlossenen Stromkreis von sehr geringem Widerstand bildet. Um den Nebenschlussmotor angehen zu lassen, muss man den Umschalter so anordnen, dass der Strom erst die Feldmagnete und dann den Anker durchfliesst, und um starke Funken und grosse Erwärmung des Ankers zu vermeiden, wenn der belastete Motor still stehen soll, müssen Zusatzwiderstände in den Ankerkreis gelegt werden, die man ausschaltet, sobald der Motor eine gewisse Geschwindigkeit erreicht hat.

Wir wollen nun untersuchen, wie die elektromotorische Kraft der Stromquelle geändert werden muss, damit ein Nebenschlussmotor unter wechselnder Belastung mit konstanter Geschwindigkeit läuft. Um die Aufgabe nicht allzusehr zu verwickeln, nehmen wir an, dass die Feldmagnete des Motors bei normaler elektromotorischer Kraft soweit erregt sind, dass eine kleine Aenderung des magnetisirenden Stromes keinen beträchtlichen Unterschied in der Feldstärke hervorbringt. Unter dieser Bedingung ändert sich die elektromotorische Gegenkraft in dem Anker des Motors direkt wie die Geschwindigkeit, und da die letztere konstant ist, so ist es auch die erstere für alle Belastungen. Es möge γ die Stromstärke im Anker bedeuten, wenn der Motor ohne Belastung läuft, i diejenige, wenn er belastet ist, und e die konstante elektromotorische Gegenkraft; alsdann ist $(i-\gamma)\, e$ gleich der äussern mechanischen Energie; und da e und γ beide konstant sind, so ändert sich mit der äussern Energie oder mit der Belastung des Motors auch nothwendigerweise die Stromstärke i im Anker. Deshalb muss die elektromotorische Kraft E der Stromquelle steigen, wenn die Belastung wächst, und abnehmen, wenn die Belastung abnimmt. Es möge W der Widerstand der Leitung und des Ankers sein, so ist

$$i = \frac{E - e}{W}$$

und

$$E = e + i\, W.$$

Wir vernachlässigen den geringen Strom, welcher für den Nebenschluss der Feldmagnete erforderlich ist. Die Gleichung zeigt alsdann, dass die elektromotorische Kraft bei konstanter Geschwindigkeit des Motors mit der Belastung wachsen muss. Sie hat den kleinsten Werth, wenn der Motor leer läuft, und den grössten, wenn Belastung und Stromstärke Maxima sind. Der Unterschied zwischen dem kleinsten und grössten Werth ist um so geringer, je kleiner der Widerstand W der Leitung und des Ankers ist, aber er kann nie ganz verschwinden, weil W nicht Null werden kann. Aus diesen Betrachtungen geht hervor, dass zwei Dynamomaschinen mit Nebenschlusswicklung unter keinen Umständen ein System der Kraftübertragung bilden können, wo der Motor mit konstanter Geschwindigkeit läuft. Denn die elektromotorische Kraft des Generators — von dem wir annahmen, dass er z. B. durch eine Dampfmaschine mit konstanter Geschwindigkeit getrieben wird — nimmt ab, wenn die Stromstärke wächst, während der Motor gerade die entgegengesetzte Beziehung zwischen diesen Grössen verlangt. Einen Nebenschlussmotor kann man mit konstanter Geschwindigkeit laufen lassen, wenn man eine überkompoundirte Dynamomaschine als Generator verwendet. Das Princip der Dynamomaschine mit Kompound- oder gemischter Wicklung, die wir schon häufiger erwähnten, ist so bekannt, dass einige Worte zu seiner Erklärung hinreichen.

Es möge die Wicklung der Feldmagnete einer Dynamomaschine auf zwei Spulen sitzen, von denen die eine von hohem Widerstand mit ihren Enden direkt an den Bürsten liegt, während die andere von geringem Widerstand in den äussern Stromkreis geschaltet ist.

Ist der letztere geöffnet, so geht kein Strom durch die Hauptspulen, und der Magnetismus der Maschine hängt allein von der erregenden Kraft der Nebenschlussspulen ab. Wenn die Maschine richtig konstruirt ist, so soll dieser Magnetismus eine elektromotorische Kraft erzeugen, die genau gleich derjenigen ist, die bei allen Stromstärken des äussern Kreises bestehen bleiben soll, vorausgesetzt, dass die Dynamomaschine mit konstanter Geschwindigkeit läuft. Fliesst ein Strom durch den Anker, so ist die Spannung an den Bürsten natürlich etwas kleiner als diejenige, welche in den Ankerspulen entsteht, weil diese in Folge des Widerstandes und der Selbstinduktion mit wachsender Stromstärke immer mehr abnimmt. Um diesen Verlust zu kompensiren, muss die elektromotorische Kraft grösser werden. Dieses besorgt der Hauptstrom automatisch durch Vergrösserung der Feldstärke, indem er den Nebenschlussstrom in der Erregung der Feldmagnete unterstützt. Bei einer richtig kompoundirten Maschine reicht die Zunahme des Magnetismus, welche die Hauptspule bewirkt, gerade aus, um die Klemmenspannung bei allen Stromstärken konstant zu halten.

Nun sehen wir leicht, dass wir hierin zu weit gehen können, wenn wir etwas feinern Draht für den Nebenschluss nehmen oder die Windungszahl der Hauptwicklung vergrössern. Durch die erste Anordnung wird die Spannung der Maschine zu klein, im andern Falle wird die Wirkung der Hauptstromwicklung die des Nebenschlusses überwiegen, wenn die Stromstärke eine gewisse Grenze überschreitet. Die Zunahme der elektromotorischen Kraft leistet alsdann mehr, als dass sie dem Verlust, der durch Widerstand und Selbstinduktion verursacht wird, das Gleichgewicht hält, und die Folge ist, dass die Klemmenspannung steigt, wenn die Stromstärke wächst. Eine solche überkompoundirte Maschine könnte man deshalb als Generator benutzen, wenn der Motor eine gewöhnliche Nebenschlussmaschine ist, und man würde auf diese Weise ein brauchbares System der Kraftübertragung bei konstanter Geschwindigkeit erhalten.

Theoretisch betrachtet ist dies ganz richtig, aber in der Praxis entsteht eine Schwierigkeit, welche davon herrührt, dass sich die Polarität einer Kompoundmaschine leicht umkehrt, besonders wenn der Einfluss der Hauptleitung bedeutend grösser ist als derjenige der Nebenschlusswicklung. Der Verfasser hat es versucht, ein solches System der Kraftübertragung für konstante Geschwindigkeit einzurichten, aber es ist ihm aus dem angegebenen Grunde nicht gelungen. Ueber den Misserfolg, der lehrreicher war, als wenn das System mit theoretischer Vollendung gewirkt hätte, wurde seiner Zeit berichtet (Electrician, April 1885); im Folgenden geben wir einen Auszug aus dieser Abhandlung.

„Wenn eine Hauptstrommaschine als Motor benutzt wird, so läuft sie in der entgegengesetzten Richtung, als wenn sie als Generator wirkt. Damit sie in derselben Richtung (z. B. vorwärts) läuft, muss die Verbindung zwischen Magnetwicklung und Anker umgeschaltet werden. Bei einer Nebenschlussmaschine verhält sich die Sache anders; wenn auch die Verbindung zwischen Magnetwicklung und Anker dieselbe bleibt, läuft sie als Motor doch vorwärts. Der Nebenschlussmotor, welchen der Verfasser gebrauchte, wurde von dem Strome einer überkompoundirten Dynamomaschine getrieben, deren Nebenschluss im Verhältnis zu der Hauptstromwicklung schwach war. Wenn der Motor wenig oder gar keine äussere Arbeit leistete, verhielt er sich höchst sonderbar; er lief abwechselnd rückwärts und vorwärts. Bei jeder Umkehrung entstanden starke Funken an den Bürsten des Motors und des Generators, und beide Maschinen waren offenbar überanstrengt und wären beschädigt worden, wenn der Stromkreis nicht unterbrochen wäre. Um diese Erscheinung zu erklären, wollen wir von der Annahme ausgehen, dass der Generator auf konstanter Geschwindigkeit gehalten und der Motor eingeschaltet wird, wenn man Triebkraft braucht. Dies ist in der Praxis gewöhnlich der Fall. Da zwischen den vom Generator kommenden Leitungen immer eine gewisse Spannung herrscht, so fliesst in dem Moment, wo man den Motor einschaltet, ein starker Strom durch dessen Anker und ein schwacher Strom durch die Magnetwicklung. Die unmittelbare Folge davon ist, dass sich der Anker mit grosser Geschwindigkeit zu drehen beginnt, bevor die Magnete vollständig erregt sind; denn man muss bedenken, dass sich der Anker auch in einem nicht erregten Felde dreht, allerdings bei bedeutendem Stromaufwand. Die Geschwindigkeit, welche nöthig ist, um eine gegebene elektromotorische Gegenkraft hervorzubringen, ist um so grösser, je schwächer die Erregung der Feldmagnete ist; folglich geht der Motor mit viel grösserer Geschwindigkeit an als im regelmässigen Betriebe bei voll erregten Magneten. Wegen der bedeutenden Selbstinduktion in der Nebenschlusswicklung dauert es einige Zeit, bis die Magnete vollständig erregt werden, und während die Feldstärke wächst, nimmt die Geschwindigkeit und die lebendige

Kraft des Ankers noch zu. Sind zuletzt die Feldmagnete gesättigt, so hat der Anker des Motors eine solche Geschwindigkeit erreicht, dass seine elektromotorische Gegenkraft nicht nur der Potentialdifferenz der Kabel, die den Strom vom Generator zuführen, gleich ist, sondern sie sogar übertrifft und eine Umkehrung der Stromrichtung bewirkt. Der Motor wirkt alsdann als Generator, indem die lebendige Kraft des Ankers als elektrische Energie dem Stromkreise wieder zugeführt wird. In Folge dessen werden die Pole der Kompoundmaschine (deren Nebenschlusswicklung, wie oben erwähnt wurde, schwach ist) umgekehrt, und nun arbeiten die Anker des Generators und des Motors hintereinander, indem letzterer den Strom des Generators verstärkt, statt ihm entgegenzuwirken. In diesem Augenblick ist die Sachlage die folgende: Die Feldmagnete des Motors haben gerade das Maximum ihres Magnetismus bei ihrer anfänglichen Polarität erreicht, die Pole des Generators sind vertauscht, und ein starker Strom von entgegengesetzter Richtung fliesst durch den Motor. Folglich kommt dieser schnell zur Ruhe und läuft dann mit grosser Geschwindigkeit rückwärts. Es setzt sich deshalb dem Strome, welcher vom Generator kommt, eine grosse elektromotorische Gegenkraft entgegen. Dieselbe wächst jedoch nicht mehr wie zuvor, sie nimmt ab, weil die ursprüngliche Erregung der Feldmagnete allmählich in Folge der Polvertauschung in der Hauptleitung verschwindet. Gerade so wie ein gewisser Zeitraum von mehreren Sekunden für die Erregung der Magnete nöthig ist, so verfliesst auch ein solcher, bis sie ihren Magnetismus verlieren. Es tritt alsdann ein Moment ein, wo die ursprüngliche Polarität dieser Magnete verschwindet, und wo deshalb die Kraft, welche den Anker rückwärts treibt, zu wirken aufhört, obgleich noch ein starker Strom hindurchgeht. Etwas später kommt der Anker zur Ruhe und läuft alsdann wieder mit grosser Geschwindigkeit vorwärts, wobei der ganze eben beschriebene Kreislauf wieder beginnt, aber diesmal mit einem Strome, welcher die entgegengesetzte Richtung hat, wie der erste. Der dritte Cyklus beginnt mit einem Strom, der dieselbe Richtung hat, wie der erste u. s. w."

Eine ähnliche Erscheinung wurde von Gérard-Lescuyer beobachtet, welcher eine Gramme'sche Hauptstrommaschine als Generator und eine magnetoelektrische Maschine als Motor benutzte. Er nannte die Erscheinung ein elektrodynamisches Paradoxon (Engineer, 17. Sept. 1880).

Sechstes Kapitel.

Die verschiedenen Systeme der elektrischen Kraftübertragung. — Uebertragung bei konstanter Spannung. — Mechanisch regulirte Motoren. — Selbstregulirende Motoren. — Uebertragung bei konstanter Stromstärke. — Schwierigkeit der Selbstregulirung. — Kraftübertragung auf grosse Entfernung. — Stromverlust durch Nebenschluss. — Theorie. — Wirthschaftlicher Wirkungsgrad. — Bedingungen für den höchsten wirthschaftlichen Wirkungsgrad. — Selbstregulirung auf konstante Geschwindigkeit. — Praktisches Beispiel.

Man muss je nach der Art der Elektricitätserzeugung verschiedene Systeme der elektrischen Kraftübertragung unterscheiden. In der Wirklichkeit ist die Mannigfaltigkeit der einzelnen Fälle beinahe unendlich; jedoch sind drei Systeme wegen ihres häufigen Vorkommens in der Praxis von besonderem Interesse. Es sind dies die folgenden:

1. Uebertragung der Energie primärer oder sekundärer Batterien zum Betriebe eines einzigen, nicht weit entfernten Motors.

2. Uebertragung der Energie einer oder mehrerer Dynamomaschinen zum Betriebe einer Anzahl von einander unabhängiger Motoren.

3. Uebertragung der Energie auf grosse Entfernungen vermittelst eines Generators und eines Motors.

Wir können auch eine andere Eintheilung machen, je nachdem die Motoren für konstante oder variable Belastung oder für konstante oder variable Geschwindigkeit bestimmt sind. Das erste System ist weder für eine konstante Belastung bestimmt, noch ist es hier erforderlich, dass die Geschwindigkeit bei variabler Belastung konstant bleibt. Wir brauchen auf die hierher gehörigen Fälle nicht näher einzugehen, da wir bei Besprechung der durch Akkumulatoren betriebenen elektrischen Bahnen hinreichend Gelegenheit haben, die Einzelheiten dieses Systems kennen zu lernen.

Die Anwendung des zweiten Systems bietet deshalb viel Schwierigkeiten, weil sämmtliche Motoren von einander unabhängig sein und, ob sie nun leer oder belastet laufen, stets dieselbe Geschwindigkeit haben sollen. Dass die Erfüllung dieser Bedingungen für eine wirkliche praktische Ausnutzung der elektrischen Kraftübertragung im Kleingewerbe und in der Hausindustrie unumgänglich nothwendig ist, zeigt eine kurze Ueberlegung. Der Motor ist bekanntlich in diesem Falle an das allgemeine Leitungsnetz angeschlossen und wird eingeschaltet, sobald Energie gebraucht wird. Hierdurch darf die Stromabnahme, die vielleicht zu Beleuchtungszwecken oder zum Betriebe anderer Motoren an einer andern Stelle des Leitungsnetzes stattfindet, nicht beeinflusst werden. Ferner muss der Motor stets mit derselben Geschwindigkeit laufen, ob er wenig oder viel Arbeit leistet. Denn die meisten Arbeiten, die ein Werkzeug zum Drehen, Hobeln u. s. w. erfordern, können nur bei einer bestimmten, vorgeschriebenen Geschwindigkeit vorgenommen werden, die von der Maschine jederzeit innegehalten werden muss.

Das dritte System bietet Schwierigkeiten verschiedener Art. Da wir es nur mit einem Generator und einem Motor zu thun haben, so ist es leichter, diese einander anzupassen, und es hat keine Schwierigkeit, eine gleichförmige Geschwindigkeit einzuhalten, da die Belastung in der Regel konstant sein wird. Die Schwierigkeit liegt in diesem Falle mehr darin, dass Leitungen und Maschinen gut isolirt werden müssen. Da dies System im allgemeinen für Uebertragung auf weite Entfernungen bestimmt ist, so hat man, wenn die Anlage sich rentiren soll, sowohl wegen der Anlagekosten als auch wegen des wirthschaftlichen Wirkungsgrades mit hochgespannten Strömen zu arbeiten. Die Verwendung hoher Spannungen ist allerdings etwas gefährlich und erfordert eine vorzügliche Isolation. Beide Schwierigkeiten können aber bei sorgfältiger Berechnung und Ausführung der Anlage leicht überwunden werden. Die Gefahr, die die elektrischen Ströme von hoher Spannung bieten, wird gewöhnlich sehr übertrieben. Ein Mensch, der mit den Händen gleichzeitig die positive und negative Leitung an einer nicht isolirten Stelle berührt, kann freilich getödtet oder ernstlich verletzt werden, wenn die Spannung 2000 oder 3000 V übersteigt. Eine solche Berührung ist jedoch bei hinreichender Vorsicht ganz ausgeschlossen. Genau dieselbe Gefahr bietet die leiseste Berührung einer rotirenden Kreissäge, durch die dem Arbeiter sofort die Finger abgeschnitten werden;

auch sind die Zahnräder trotz der vielen Unglücksfälle, die sie bereits im Gefolge gehabt haben, in der Technik in fortdauernder Anwendung geblieben. Wie man Mittel gefunden hat, um das Menschenleben vor der Gefährdung durch Werkzeugmaschinen aufs wirksamste zu schützen, so hat auch die Erfahrung der letzten Jahre gezeigt, dass es ebenso wirksame Schutzmittel gegen hohe elektrische Spannungen giebt.

Das zweite System wird am besten als elektrische Uebertragung und Vertheilung von Energie von einer Centralstation nach verschiedenen entfernten Punkten bezeichnet. Die Vertheilung kann auf Grund von Parallel- oder Reihenschaltung stattfinden. Im ersten Falle muss die Spannung zwischen der positiven und negativen Leitung konstant gehalten werden, und die Motoren sind sämmtlich zu diesen Leitungen parallel zu schalten; im zweiten Falle ist die Stromstärke in den Leitungen konstant zu halten, und jeder Motor wird, wenn er Arbeit leistet, von demselben Strome durchflossen. Die Spannung in der Station muss in diesem Falle um so höher sein, je grösser die Zahl der arbeitenden Motoren ist. Im ersten Falle wird die Spannung konstant gehalten, aber der in die Leitungen zu liefernde Strom muss um so stärker sein, je grösser die Zahl der im Betriebe befindlichen Motoren ist. Wir haben demnach zwischen Vertheilung bei konstanter Spannung und Vertheilung bei konstanter Stromstärke zu unterscheiden.

Wir wollen nun auf die theoretischen Bedingungen des ersten Systems näher eingehen. Vom Standpunkte des wirthschaftlichen Betriebes ist es sofort einleuchtend, dass die Verwendung künstlicher Widerstände zur Erzielung einer gleichförmigen Geschwindigkeit nur zu einer unvollkommenen Lösung dieser Frage führen kann und deshalb, wenn andere Mittel zur Verfügung stehen, besser ausser Spiele bleibt. Im vorliegenden Falle haben wir glücklicherweise zwei Mittel, mit Hülfe deren wir die Leistung des Motors für einen bestimmten Zweck ohne Verlust reguliren und dabei seine Geschwindigkeit konstant halten können. Erstens können wir eine mechanische Vorrichtung anwenden, die je nach der Leistung des Motors die Zufuhr der Energie in bestimmten Zwischenräumen unterbricht, und zweitens können wir uns einer elektrischen Vorrichtung bedienen, indem wir die Feldmagnete mit einer besondern Wicklung versehen, durch die die Zugkraft des Ankers automatisch so regulirt wird, dass sie der jedesmaligen Belastung entspricht. Ayrton und Perry haben in einem Vortrage über Elektromotoren und deren Regulirung[1]) einige Angaben über die zuerst angeführte Anordnung gegeben. Sie sagen: „Die Methode der gänzlichen Unterbrechung der Energiezufuhr ist deshalb sehr mangelhaft, weil die Energiezufuhr immer vollständig aufhört, während sie nur im gleichen Verhältnis, wie die Belastung abnehmen sollte. Die Regulirung des Motors ist in Folge dessen eine spasmodische, wie die eines Gasmotors, der an demselben Uebelstand leidet; auch hier tritt entweder die gesammte Gasmenge ein oder sie ist völlig abgesperrt. Ein solcher spasmodischer Regulator besteht in seiner einfachsten Form aus einem rotirenden Quecksilberbehälter, in dessen Mitte von oben ein Draht hineinragt; bei langsamer Geschwindigkeit des Motors taucht der Draht unter den Quecksilberspiegel und schliesst so den Stromkreis des Motors; bei zunehmender Geschwindigkeit jedoch nimmt die Oberfläche des Quecksilbers eine parabolische Form an und sinkt in der Mitte soweit, dass der Kontakt zwischen Draht und Quecksilber unterbrochen wird.“ An einer spätern Stelle sagen die Erfinder: „Die erste Neuerung, die wir an dieser Regulirungsweise vornahmen, bestand darin, dass wir den spasmodischen Regulator durch einen periodischen ersetzten. Bei dem letztern ist die Zufuhr der Energie keinen Augenblick unterbrochen, aber sie ist während der verschiedenen Phasen einer Umdrehung eine verschiedene. Der Zeitraum, in dem dem Motor während einer Umdrehung mehr oder weniger Energie zugeführt wird, ist ausschliesslich durch die von ihm zu leistende Arbeit bestimmt. Unser periodischer Regulator unterscheidet sich deshalb von dem spasmodischen in derselben Weise, wie ein guter Dampfmaschinenregulator von dem bei Gasmotoren üblichen. Die im Folgenden beschriebene Anordnung ermöglicht eine solche Regulirung: Die Bürste A (Fig. 66) schleift auf dem rotirenden Stücke BK, dessen cylindrische Oberfläche aus zwei leitenden Theilen besteht, die mit einander durch einen Widerstand verbunden sind. Die Bürste A kann sich unter Einwirkung der Regulatorkugeln auf dem Cylinder BK entlang bewegen. Wenn sie das Kontaktstück B berührt, so empfängt der Motor den Strom direkt; liegt sie jedoch an K an, so muss der Strom seinen Weg durch den zwischen B und K eingeschalteten Widerstand nehmen und erfährt so eine Schwächung. Entfernen sich

[1]) Journal of the Society of Telegraph Engineers and Electricians, Bd. 12, No. 49.

die Regulatorkugeln von einander, so wird die Bürste in der Weise auf dem Cylinder BK verschoben, dass sie während eines grössern Theiles einer Umdrehung den Theil K berührt; nähern sich die Kugeln bei fallender Umdrehungszahl des Motors einander, so wird die Bürste in entgegengesetzter Richtung auf dem Cylinder entlang bewegt und liegt in Folge dessen während des grössern Theiles einer Umdrehung an B. Bei Hintereinanderschaltung von Motoren wird diese Anordnung in der Weise getroffen, dass der periodische Regulator in bestimmten Zeiträumen eine Abzweigung vom Stromkreis des Motors schliesst, anstatt in den Stromkreis desselben Widerstand einzuschalten. In diesem Falle ist die Anordnung folgende: B ist aus isolirendem Material, K aus Metall verfertigt; K ist mit dem

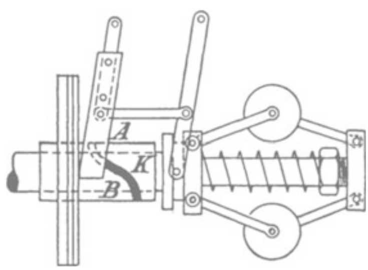


Fig. 66.

einen Ende des als Nebenschluss zum Motor bestimmten Widerstandes verbunden, während das andere Ende dieses Widerstandes an einer der Klemmen des Motors anliegt, dessen andere Klemme mit der Bürste A in leitender Verbindung steht. Wenn dann die Bürste auf B schleift, ist der Nebenschluss offen, und der gesammte Strom fliesst durch den Motor, während der Nebenschluss bei Berührung der Bürste mit K von einem Theile des Stromes durchflossen wird.“

Es scheint, als litten diese beiden von Ayrton und Perry angegebenen Regulirungsmethoden zum Theil an dem Fehler, dass künstliche Widerstände zur Verwendung gelangen, gleichviel ob sie nun für Nebeneinander- oder Hintereinanderschaltung bestimmt sind. Der hierdurch bedingte Energieverlust kann dadurch verringert werden, dass man den Widerstand bei Nebeneinanderschaltung möglichst hoch nimmt und bei Hintereinanderschaltung möglichst gering. Aus rein theoretischen Gründen könnte ein Verlust gänzlich vermieden werden, wenn man den Widerstand bei Nebeneinanderschaltung unendlich gross wählte, d. h. wenn man den Strom während eines gewissen Theiles einer Umdrehung unterbräche. Aber dadurch würde einerseits die Zugkraft des Ankers zu ungleichförmig werden, und anderseits würden sich zwischen der Bürste A und den Kontaktstücken B und K Funken bilden. Eine Funkenbildung ist ebenfalls nicht zu vermeiden, wenn der Widerstand der Verbindung zwischen B und K oder der des Nebenschlusses zwischen K und einer Klemme des Motors ziemlich klein ist. Ayrton und Perry sind deshalb der Ansicht, dass bei allen derartigen Regulatoren Funkenbildung nicht zu vermeiden sei, und dass man deshalb Motoren mit einer solchen Wicklung den Vorzug geben müsse, vermöge der sie sich ohne jegliche mechanische Vorrichtung selbst reguliren.

Ein selbstregulirender Motor bildet im Allgemeinen die Umkehrung einer selbstregulirenden Dynamomaschine, die für konstante Spannung gewickelt ist. Bei der Kompound-Dynamomaschine muss die Klemmenspannung konstant gehalten werden, wenn auch der Widerstand des äussern Stromkreises in weiten Grenzen eine Veränderung erfährt. Dies hat ein Anwachsen der Stromstärke bei Abnahme des äussern Widerstandes zur Folge. Die der Maschine zuzuführende Kraft ist daher annähernd proportional der Stromstärke, und die Maschine arbeitet unter folgenden Bedingungen:

Umdrehungszahl konstant — Spannung konstant — Stromstärke variabel — Antriebskraft der Maschine ebenfalls variabel, aber proportional der Stromstärke.

Ein selbstregulirender Motor muss nun folgende Bedingungen erfüllen:

Umdrehungszahl konstant — Spannung konstant — Leistung variabel — Stromstärke zum Betriebe des Motors variabel, aber der Leistung proportional.

Wie bereits auseinandergesetzt, sind Dynamomaschine und Elektromotor im allgemeinen umkehrbare Begriffe; und wenn es auch Fälle giebt, in denen es unpraktisch ist, einen Motor als Dynamomaschine zu betreiben, so hat es jedoch niemals Schwierigkeiten, eine Dynamomaschine als Motor arbeiten zu lassen. Darnach lässt es sich erwarten, dass eine gut kompoundirte Dynamomaschine bei derselben Schaltung der Feldmagnetspulen und der Ankerwicklung ohne weiteres als selbstregulirender Motor benutzt werden kann;

allerdings muss der Strom bei konstanter Spannung zugeführt werden. Spricht man nämlich von einem selbstregulirenden Motor in dem Sinne, dass seine Geschwindigkeit bei jeglicher Belastung selbstthätig konstant gehalten werden soll, so ist dies nur für solche Fälle zu verstehen, in denen die Belastung zwischen Null und einem Maximum des Regulirungsbereiches schwankt. Wenn wir den Motor überlasten, so wird seine Geschwindigkeit nachlassen und in Folge dessen seine Selbstregulirung aufhören, gerade so wie die Spannung der besten Kompound-Dynamomaschine sinken wird, wenn wir ihr zu viel Strom entnehmen. Aber halten wir bei dem Motor die Belastung und bei der Dynamomaschine die Stromstärke in angemessenen Grenzen, so können beide Maschinen mit gleichen Mitteln selbstregulirend gemacht werden. Dieselben Windungen nämlich, durch die wir bei der Dynamomaschine eine konstante Klemmenspannung erzielen, bewirken, dass der Motor mit konstanter Geschwindigkeit läuft. Dieses Ergebnis war wegen der allgemeinen Umkehrbarkeit dieser Maschinen zu erwarten; da es jedoch von grosser praktischer Bedeutung ist, soll es besonders bewiesen werden.

Auf Grund der Formeln des dritten Kapitels lässt sich der Beweis leicht führen. Nach Gleichung (7) ist das Drehungsmoment T, das der Ankerstrom J_a in einem Felde von z Kraftlinien ausübt, im absoluten Maasse

$$T = \frac{z \nu \sigma J_a}{\pi}.$$

Es ist demnach unabhängig von der Geschwindigkeit und, da $\nu \sigma$ für einen gegebenen Motor konstant ist, direkt proportional dem Produkte aus Feldstärke und Stromstärke im Anker. Lassen wir beide Faktoren oder einen derselben wachsen, so sind wir im Stande, der gesteigerten Belastung das Gleichgewicht zu halten. Da wir annehmen, dass die Klemmenspannung konstant ist, so können wir augenscheinlich eine Veränderung in der Belastung nur durch eine Veränderung der Stromstärke ausgleichen. Unter der Annahme, dass die Nebenschlusswicklung der Feldmagnete parallel zum äussern Stromkreise, nicht zum Anker, liegt, haben wir unter Beibehaltung der Bezeichnungen des dritten Kapitels die folgenden Gleichungen:

$$J_n = \frac{E_k}{w_n}; \quad J_a = J_d$$

$$E_b = E_k - w_d J_d; \quad E_a = E_k - (w_a + w_d) J_a.$$

Die elektromotorische Gegenkraft ausgedrückt in Volt ist nach Gleichung (5)

$$E_a = z \nu \sigma \frac{n}{60} 10^{-8},$$

$$E_k - (w_a + w_d) J_a = z \nu \sigma \frac{n}{60} 10^{-8}.$$

Da wir nun als Bedingung aufgestellt haben, dass die Klemmenspannung des Motors konstant sein soll, so ist

$$E_k = (w_a + w_d) J_a + z \nu \sigma \frac{n}{60} 10^{-8} = \text{Konst.}$$

Weil die Geschwindigkeit n ebenfalls konstant bleiben muss, wenn der Motor bei jeder Belastung sich selbst reguliren soll, so sind z und J_a die einzigen Veränderlichen, die der obigen Gleichung zu genügen haben. Wir haben somit die Feldstärke z als eine Funktion der Stromstärke im Anker J_a aufzufassen, und die Bedingung dafür, dass sich der Motor selbst regulirt, besteht darin, dass die Feldstärke in bestimmter, durch die nachfolgende Gleichung ausgedrückter Beziehung zur Stromstärke im Anker steht; es muss sein

$$z = \frac{E_k - (w_a + w_d) J_a}{\nu \sigma \frac{n}{60}} 10^8.$$

Wir sehen aus dieser Gleichung, dass z um so kleiner sein muss, je grösser J_a ist; und da J_a nahezu proportional der Belastung des Motors ist, so gelangen wir zu dem auf den ersten Blick befremdenden Ergebnis: Je grösser die vom Motor geleistete Arbeit ist, um so schwächer muss die Feldstärke sein. Man sollte denken, dass bei gesteigerter Belastung Mittel angewandt werden müssten, um die Feldmagnete zu verstärken, damit sie eine stärkere Anziehung auf den Anker ausüben können. Aber eine kurze Ueberlegung zeigt, dass eine derartige Anordnung die Geschwindigkeit verringern würde. Die magnetische Anziehung, welche die Feldmagnete auf den Anker ausüben, hängt nicht allein von der Feldstärke ab, sondern sie ist gleich dem Produkte dieser Grösse und der Stromstärke im Anker. Sie wird daher in jedem Falle zunehmen, ob wir nun das Feld verstärken oder die Stromstärke im Anker wachsen lassen, oder ob wir beide Mittel gleichzeitig anwenden. Wenn wir das magnetische Feld verstärken, vergrössern wir nicht nur die Zugkraft zwischen Feldmagneten und Anker, sondern lassen auch die elektromotorische Gegenkraft zunehmen, wie sich aus Gleichung (5) (S. 71) ergiebt, und verringern auf diese Weise die Stromstärke im Anker zu einer Zeit, in der wir am meisten Energie nöthig haben. Der Motor würde deshalb so lange langsamer laufen, bis seine elektromotorische Gegenkraft soweit abgenommen hat, dass ein Strom von genügender Stärke für die zu leistende Arbeit den Anker durchfliesst. Wenn wir auf der andern Seite die Zugkraft des Ankers dadurch zu vergrössern suchen, dass wir einen stärkern Strom durch den Anker schicken, so vermehren wir allerdings die elektromotorische Gegenkraft nicht, erhalten aber eine geringe Vergrösserung des Spannungsverlustes im Anker. Um letztere auszugleichen, hat man die Feldstärke für starke Ströme etwas zu schwächen und so die elektromotorische Gegenkraft um einen der Zunahme des Spannungsverlustes im Anker entsprechenden Betrag zu vermindern. Wenn der Motor leer läuft, ist J_a nahezu gleich Null und das Feld am stärksten. Wir haben dann

$$z = \frac{E_k \, 10^8}{\nu \, \sigma \, \frac{n}{60}},$$

wo die Feldstärke z ausschliesslich von der Nebenschlusswicklung erzeugt wird. Belasten wir den Motor jetzt, so wird seine Geschwindigkeit sofort langsam sinken. Die elektromotorische Gegenkraft, die anfangs nahezu gleich E_k war, wird deshalb etwas geringer werden; in Folge dessen fliesst ein starker Strom durch den Anker und die direkten Windungen der Feldmagnete. Hierdurch wird weiter die Geschwindigkeit des Ankers beschleunigt, bis sie wieder ihren normalen Werth erreicht hat. Die Richtung der direkten Windungen muss deshalb eine derartige sein, dass sie auf den Magnetismus der Feldmagnete schwächend wirken. Bei einer Kompoundmaschine sind die direkten Windungen so angeordnet, dass sie den durch die Nebenschlusswicklung erzeugten Magnetismus zu verstärken suchen. Wenn wir eine derartige Dynamomaschine als Motor benutzen, so bleibt die Stromrichtung in der Nebenschlusswicklung dieselbe wie zuvor, im Anker wird sie jedoch umgekehrt; der Strom erzeugt auf diese Weise Bewegung, anstatt derselben entgegenzuwirken, wie in dem Falle, wenn die Maschine als Dynamomaschine benutzt wird.

In den direkten Windungen wird die Stromrichtung ebenfalls umgekehrt und so eine Schwächung der Feldmagnete bewirkt. Man sieht, dass dies genau den Bedingungen entspricht, die unserer Theorie gemäss nöthig waren, um den Motor sich selbst reguliren zu lassen, und dass man mit Recht sagen darf, eine Kompoundmaschine kann entweder als selbstregulirender Generator oder als selbstregulirender Motor benutzt werden. Es mögen kleine Unterschiede bei der Wahl des Verhältnisses für die Zahl der direkten Windungen zu der der Nebenschlusswindungen vorhanden sein, aber das allgemeine Princip der Kompoundwicklung ist in beiden Fällen dasselbe.

Eine Frage von grosser praktischer Bedeutung ist die Beziehung zwischen dem Gewicht des Motors und seiner maximalen Leistung. Da seine Leistung am grössten ist, wenn das Feld die geringste Stärke besitzt, ein Motor ohne Selbstregulirung aber jeder Zeit so konstruirt werden kann, dass er bei höchster Feldstärke auch am meisten leistet, so muss der selbstregulirende Motor offenbar für eine gegebene Leistung schwerer sein. Dies ist ohne Zweifel ein Nachtheil, und es ist zunächst klarzustellen, wie weit etwa der Vortheil der Selbstregulirung durch das vergrösserte Gewicht bei gleicher Leistung aufgehoben wird. Unsere Formel für z setzt uns in den Stand, die Zunahme an Gewicht ungefähr zu überschlagen. Die Differenz zwischen dem anfänglichen Werthe von z und seinem Minimum hängt von dem Produkte $(w_a + w_d) J_a$ ab. Je grösser dies Produkt ist, um so stärker muss das Feld geschwächt werden, und um so geringer ist die maximale Leistung, die wir bei einem gegebenen Gewicht erreichen können. Es ist daher von Wichtigkeit, das Produkt $(w_a + w_d) J_a$ so klein wie möglich zu nehmen, und da J_a als primäre Kraftquelle nicht verringert werden kann, so muss man mit dem Widerstande des Ankers und der direkten Wicklung möglichst heruntergehen. Bei guten Motoren, wie man sie neuerdings baut, schwankt nun der dem Widerstande dieser Theile entsprechende Spannungsverlust zwischen 5 und 10 % der Klemmenspannung. Nehmen wir als Mittelwerth 7 %, so finden wir, dass das Feld, das anfangs 1000 Kraftlinien enthielt, bei voller Belastung 930 Kraftlinien umfassen muss. Wäre der Motor nicht selbstregulirend, so würde das Feld bei voller Belastung 1000 Kraftlinien zählen und so im Stande sein, $7\frac{1}{2}$ % mehr an mechanischer Energie zu entwickeln. Wenn auf der andern Seite die beiden Motoren die gleiche maximale mechanische Arbeit leisten sollen, so müssten die Feldmagnete des selbstregulirenden Motors einen um $7\frac{1}{2}\%$ grössern Querschnitt haben. Da ferner die direkten und die Nebenschlusswindungen einander entgegenwirken, so ist auch ein grösserer Aufwand an Kupfer erforderlich, der sich auf etwa $2\frac{1}{2}\%$ des Gesammtgewichts belaufen wird. Ein selbstregulirender Motor wiegt daher im Ganzen 10% mehr als ein gewöhnlicher Motor ohne Selbstregulirung. Dies ist jedenfalls in Anbetracht der Sicherheit und Bequemlichkeit, die ein selbstregulirender Motor bietet, nicht zuviel. So hat sich denn auch in allen Städten, in denen elektrische Centralen nach dem Parallelschaltungssystem die Beleuchtung besorgen, herausgestellt, dass man mit Vortheil dasselbe Kabelnetz dazu benutzen kann, um motorische Kraft an Handwerker und Kleingewerbetreibende unter Verwendung derartiger selbstregulirender Motoren zu vertheilen.

Die elektrische Energievertheilung bei konstanter Stromstärke ist nicht so leicht zu lösen, wie die bei konstanter Spannung, und die sich hier darbietenden Schwierigkeiten sind principieller Natur. Sie beruhen darauf, dass die Geschwindigkeit des Motors nicht in direkter Beziehung zur Stärke des Ankerstromes steht. Bei der direkten Abhängigkeit der Geschwindigkeit von der elektromotorischen Kraft ist für konstante Spannung eine Selbstregulirung möglich, ohne dass man äussere Hülfsmittel in Gestalt einer mechanischen Steuerung oder einer andern Vorrichtung anzuwenden braucht, die bei jeder Belastung auf konstante Geschwindigkeit regulirt. Aber bei konstanter Stromstärke ist eine Art äusserer Regulirung nothwendig. Dies folgt auch unmittelbar aus den im dritten Kapitel (S. 78) erwähnten Versuchen von Marcel Deprez. Wir haben gesehen, dass die Geschwindigkeit von der Stromstärke gänzlich unabhängig war; letztere blieb im Laufe einer Versuchsreihe annähernd konstant, während die Geschwindigkeit durch Erhöhung der im Stromkreise wirkenden elektromotorischen Kraft in einigen Fällen ihren fünffachen Werth annahm. Wenn eine Anzahl von Motoren hintereinandergeschaltet wird, wie es in einem allgemeinen Vertheilungssystem der Fall sein würde, werden die Schwierigkeiten bedeutend vergrössert. Um diesen Gegenstand experimentell zu prüfen, hat der Verfasser drei vollkommen gleichartig gebaute Motoren, deren Magnete vom Hauptstrom umflossen wurden, in denselben Stromkreis hintereinandergeschaltet. Der Strom wurde durch eine Dynamomaschine geliefert, und die drei Motoren wurden durch Bremszäume möglichst gleich belastet. Es ergab sich, dass es völlig unmöglich war, alle drei

Motoren eine Zeit lang auf gleicher Geschwindigkeit zu halten. Die geringste Unregelmässigkeit in der Stromstärke oder in der Reibung der Bremszäume brachte zunächst den einen und dann den andern Motor zum Stillstand, während die Geschwindigkeit des dritten in gefährlicher Weise zunahm.

Ayrton und Perry haben in der oben erwähnten Abhandlung folgende Methode vorgeschlagen, nach der sich Motoren für konstante Stromstärke selbst reguliren sollen: Die Feldmagnete (Fig. 67) erhalten zwei einander entgegenwirkende Wicklungen. Die eine aus dünnem Draht ist der Ankerwicklung parallel geschaltet, die andere aus dickem Draht wird vom Ankerstrom durchflossen. Anker und Nebenschlusswicklung stellen einen Nebenschlussmotor dar, während

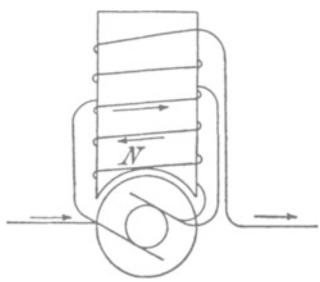


Fig. 67.

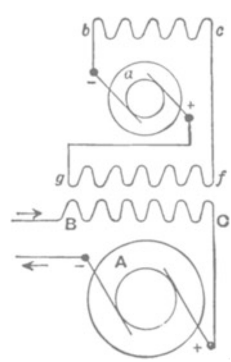


Fig. 68.

Anker und Hauptstromwicklung wie ein bremsender Generator wirken, der jeden Ueberschuss an Kraft in sich aufzunehmen bestrebt ist, wenn die Belastung zu gering wird. Dies System scheint praktisch nicht erprobt worden zu sein; aus theoretischen Gründen liess sich jedoch voraussagen, dass es praktisch nicht verwendbar ist. Nach Gleichung (7) ist augenscheinlich das Feld am stärksten, wenn die Belastung ihren grössten Betrag erreicht. Nehmen wir nun an, die Differentialwicklung könnte so abgepasst werden, dass für eine gegebene Belastung das Feld gerade die richtige Stärke hätte, um die normale Geschwindigkeit hervorzubringen. Wenn jetzt die Belastung um einen äusserst geringen Betrag erhöht wird, so wird die unmittelbare Folge davon sein, dass die Geschwindigkeit etwas nachlässt, und der Strom in den dünnen Windungen geschwächt wird. Das

Feld wird also auch etwas schwächer. Hieraus folgt eine weitere Abnahme der Geschwindigkeit und damit eine weitere Schwächung des Feldes; dieses Spiel setzt sich solange fort, bis der Anker still steht. In diesem Augenblick wird der magnetisirende Einfluss der direkten Windungen, der in der entgegengesetzten Richtung wie der der Nebenschlusswindungen wirkt, allein zur Geltung kommen und den Magnetismus der Schenkel umkehren. Diese Anordnung hat also das Bestreben, die Richtung der Bewegung umzukehren, und so bringt eine kleine Zunahme der Belastung den Anker nicht allein zum Stillstande, sondern sie lässt ihn sogar rückwärts laufen. Wann diese Rückwärtsbewegung eintritt, hängt lediglich von dem Verhältnis der magnetisirenden Kräfte der beiden gegen einander wirkenden Wicklungen ab.

In einer spätern Abhandlung, die Ayrton und Perry der Physical Society am 26. Mai 1888 vorlegten, wird behauptet, man könne die Motoren für konstanten Strom selbstregulirend machen, indem man die direkten Windungen auf dem Feldmagnet ganz fortlässt und in den Ankerstromkreis eine Akkumulatorenbatterie einschaltet, deren elektromotorische Kraft den Strom verstärkt. Auch mit diesem System sind praktische Versuche nicht gemacht worden, doch lassen sich gegen dasselbe ähnliche Einwände erheben, wie gegen die erste Methode. Motoren für konstante Stromstärke finden ausschliesslich in den Vereinigten Staaten in Stromkreisen für Bogenlampen Verwendung, aber alle sind mit einer Vorrichtung ausgerüstet, vermöge der bei Aenderung der Belastung entweder die Bürsten verstellt werden, oder die erregende Kraft verändert wird. Der Versuch, eine Selbstregulirung derartiger Motoren ohne solche Vorrichtungen zu bewirken, dürfte sehr wenig Aussicht auf praktischen Erfolg haben.

Eine vom Verfasser ersonnene Anordnung, die die Bedingung der konstanten Geschwindigkeit etwas besser zu erfüllen scheint, ist in Fig. 68 abgebildet. A ist der Anker eines Hauptstrommotors; er sitzt auf derselben Achse mit einem zweiten Anker a einer kleinern Hauptstrommaschine. Letztere hat nur den Zweck, Strom zur Schwächung der Feldmagnete des Motors zu liefern. Der Hauptstrom magnetisirt diese, indem er sie in der Richtung von B nach C umfliesst, der Hülfsstrom der Dynamomaschine fliesst in der Richtung von f nach g und hat das Bestreben, die Feldmagnete zu schwächen. $b\,c$ stellt die Wicklung der Feldmagnete der Dynamomaschine dar. Nun giebt es für jede Dynamomaschine, die, wie im vorliegenden Falle, auf einen geschlossenen Stromkreis von konstantem Widerstande arbeitet, eine kritische Geschwindigkeit, bei der sie zuerst einen Strom von nennenswerthem Betrage liefert. Läuft sie mit einer kleinern Geschwindigkeit, so liefert sie einen nur sehr geringen Strom. Erreicht die Geschwindigkeit diesen kritischen Punkt, so giebt die Maschine fast plötzlich den vollen Strom. Läuft nun der Motor mit der kritischen Geschwindigkeit der kleinen Dynamomaschine, so wird seine Geschwindigkeit bei einer geringen Erhöhung der Belastung unmittelbar geschwächt, und die Geschwindigkeit der kleinen Dynamomaschine liegt daher unter der kritischen. Die Dynamomaschine wird deshalb theilweise oder gänzlich aufhören, Strom zu liefern, und ihr entmagnetisirender Einfluss, der bislang die Feldstärke unter ihrem höchsten Betrage hielt, wird in geringerm oder stärkerm Maasse verschwinden. Die Feldstärke wächst auf diese Weise, und auf den Anker wirkt eine verstärkte magnetische Anziehung, durch welche die Zunahme der Belastung überwunden wird. Läuft der Motor leer, so hat er das Bestreben durchzugehen; dies verhindert aber sofort die Hülfsdynamomaschine, die bei geringer Zunahme der Geschwindigkeit bedeutend mehr Strom liefert. Die entmagnetisirende Wirkung derselben wird in Folge dessen so bedeutend erhöht und die Feldmagnete des Motors so geschwächt, dass gerade noch genug Kraft übrig bleibt, um die Dynamomaschine anzutreiben. Um diese Anordnung wirkungsvoll zu machen, müssen die Feldmagnete der Hülfsdynamomaschine aus sehr weichem Eisen hergestellt werden, damit man möglichst frei vom Einfluss des remanenten Magnetismus wird, der den Werth der kritischen Geschwindigkeit verändern würde, je nachdem der Magnetismus steigt oder fällt. Aus diesem Grunde müssen auch die beiden Anker in beträchtlicher Entfernung von einander auf der Achse angebracht werden, damit die Feldmagnete des Motors nicht inducirend auf die der Dynamomaschine einwirken und so die kritische Geschwindigkeit beeinflussen können. In der Praxis würde es nöthig sein, ein Lager zwischen den beiden Ankern anzubringen, das dann leicht so gestaltet werden könnte, dass es gleichzeitig als magnetischer Schirm diente.

Der zu Beginn dieses Kapitels gemachten Eintheilung gemäss haben wir jetzt das dritte System zu betrachten, das die Uebertragung von Energie zwischen zwei entfernten Punkten vermittelst eines Generators und eines Motors umfasst.

E_a, E_b und E_k mögen die elektromotorische Kraft im Anker, die Spannung an den Bürsten und an den Klemmen des Generators bedeuten, und e_a, e_b und e_k dieselben Grössen für den Motor; W_a und W_m sollen den Widerstand des Ankers und der Magnetwicklung für den Generator bezeichnen, und w_a und w_m dasselbe für den Motor. Dann haben wir nach den Gleichungen (15) bis (22), wenn die Magnete beider Maschinen mit Hauptstromwicklung versehen sind, die folgenden Beziehungen:

Generator	Motor
$E_a = E_b + J W_a$	$e_a = e_b - i w_a$
$E_b = E_k + J W_m$	$e_b = e_k - i w_m$
$E_k = E_a - J (W_a + W_m)$	$e_k = e_a + i (w_a + w_m)$,

wo J die vom Generator in die Leitung gelieferte Stromstärke bedeutet und i die vom Motor aufgenommene. Wenn die Isolation der Leitung vollständig wäre, würden diese beiden Stromstärken gleich sein; aber in der Praxis wird stets ein geringer Stromverlust eintreten, wenn die Leitung mehrere Meilen lang ist, und wir haben deshalb zu setzen

$$J > i.$$

Der Stromverlust $J - i$ stellt für den Generator einen Energieverlust dar, der gleich

$$E_k (J - i) \text{ Watt}$$

ist.

Bezieht man sich auf den Motor, so schwächt dieser Verlust nicht nur den Strom, der an der Empfangsstation verwendbar ist, sondern er lässt auch die nutzbare Spannung e_k unter den Betrag sinken, der der Stromstärke i entspricht. Wenn nämlich der Verlust nicht in der Nähe des Generators stattfindet, so werden natürlich Theile der Leitung durch eine Stromstärke von höherm Betrage als i belastet sein, und der dem Leitungswiderstande entsprechende Spannungsverlust wird deshalb grösser sein als das Produkt aus diesem Widerstande und dem Motorstrome i. Ist die Leitung auf ihrer gesammten Länge gleich gut isolirt, so wird die Längeneinheit überall den gleichen Isolationswiderstand haben, der im Vergleiche zum Leitungswiderstande selbst sehr hoch sein müsste. Bezeichnet man mit W_l den Leitungswiderstand der Leitung und mit ϱ den

Isolationswiderstand zwischen positiver und negativer Leitung für die Längeneinheit und mit l die Entfernung zwischen Generator und Motor, so wird der gesammte Isolationswiderstand, wie wir ihn mit der Wheatestone'schen Brücke bestimmen können, $W_i = \frac{\varrho}{l}$. Wenn man diesen Betrag nun wirklich gemessen hat, so sollte man annehmen, dass der Stromverlust $J - i$ nach dem Ohm'schen Gesetze durch die Bildung des Quotienten aus Spannungsdifferenz zwischen den beiden Leitern und Isolationswiderstand leicht berechnet werden könnte. Dies würde jedoch aus dem einfachen Grunde nicht richtig sein, weil die Spannungsdifferenz zwischen den Leitern keine Konstante ist, sondern in einem bestimmten Verhältnis abnimmt, je mehr wir uns dem entfernten Ende der Leitung nähern. Das Gesetz, nach dem diese Abnahme vor sich geht, hängt nicht nur vom Leitungswiderstande und der Stromstärke, sondern auch vom Isolationswiderstande ab. Die Frage ist also nicht so einfach, wie sie auf den ersten Blick erscheint. Eine angenäherte Lösung jedoch, die für praktische Zwecke genügende Genauigkeit besitzt, ist folgende.

Bezeichnet man mit ε die Spannung zwischen den Leitern in der Entfernung x vom Generator und entspricht einer Zunahme der Entfernung x um dx eine Abnahme des Stromes um di, so soll die entsprechende Verringerung der Spannungsdifferenz zwischen den Leitern $d\varepsilon$ sein. Unter diesen Umständen gelten augenscheinlich die folgenden Gleichungen:

$$- d\varepsilon = i \frac{W_l}{l} dx$$

$$- di = \frac{\varepsilon}{\varrho} dx.$$

Hieraus folgt

$$\varepsilon\, d\varepsilon = \frac{W_l}{l} \varrho\, i\, di$$

und durch Integration

$$\varepsilon^2 - \frac{W_l \varrho}{l} i^2 = \text{Konst.}$$

Um die Konstante zu bestimmen, wenden wir die Formel auf das am Generator liegende Ende der Leitung an, wo $\varepsilon = E_k$ und $i = J$ ist, und erhalten die Beziehung

$$E_k^2 - e_k^2 = \frac{W_l \varrho}{l} (J^2 - i^2),$$

woraus weiter folgt

$$i = \sqrt{J^2 - \frac{l}{W_l \varrho} \left(E_k^2 - e_k^2\right)}.$$

Diese Formel giebt uns die Stärke des am Motor ankommenden Stromes, aber in wenig zweckmässiger Form. Um diesen Ausdruck zu vereinfachen, entwickeln wir die Quadratwurzel in eine Reihe und schreiben unter Vernachlässigung der zweiten und höhern Potenzen

$$i = J - \frac{1}{2} \frac{l}{W_l \varrho} \cdot \frac{E_k^2 - e_k^2}{J}.$$

Nun ist

$$E_k^2 - e_k^2 = \left(E_k + e_k\right) \left(E_k - e_k\right)$$

und

$$\frac{\varrho}{l} = W_i,$$

also

$$i = J - \frac{E_k + e_k}{2} \cdot \frac{1}{W_i} \cdot \frac{E_k - e_k}{W_l J}.$$

Der Stromverlust ist also

$$J - i = \frac{E_k + e_k}{2} \cdot \frac{1}{W_i} \cdot \frac{E_k - e_k}{W_l J} \quad . \; . \; . \; . \; . \quad (30)$$

$\frac{E_k + e_k}{2}$ ist das Mittel aus den an den beiden Enden der Leitung herrschenden Spannungsdifferenzen, und $\frac{E_k + e_k}{2} \cdot \frac{1}{W_i}$ bezeichnet den Strom, der bei dieser mittlern Spannungsdifferenz durch W_i, den gesammten Widerstand der Isolation, fliessen würde. Dieser Strom multiplicirt mit $\frac{E_k - e_k}{W_l J}$ giebt den wirklich stattfindenden Stromverlust. Man sieht, dass $W_l\, J$, das Produkt eines Widerstandes und einer Stromstärke, eine Spannungsdifferenz darstellt. In diesem speciellen Falle bedeutet sie diejenige elektromotorische Kraft, die zur Erzeugung eines Stromes J in einer vollständig isolirten Leitung vom Widerstande W_l nöthig sein würde, vorausgesetzt, dass die entfernten Enden in metallischem Kontakt ständen. $W_l\,J$ bedeutet daher den Spannungsverlust, der ohne Berücksichtigung des Verlustes durch die Isolation stattfinden würde. Der wirkliche Spannungsverlust $E_k - e_k$ ist natürlich etwas grösser, und es wird deshalb das Verhältnis des letztern zu ersterm stets grösser als Eins sein. Hieraus folgt, dass der auf mangelhafte Isolation zurückzuführende Stromverlust erheblich grösser ist als diejenige Zahl, die wir erhielten, wenn wir den Mittelwerth aus den Spannungsdifferenzen an den Enden der Leitung durch den gesammten Isolationswiderstand dividirten. Ist der Isolationswiderstand sehr hoch und der Leitungswiderstand sehr gering, so kann der Stromverlust mit genügender Genauigkeit durch die Formel

$$J - i = \frac{E_k - e_k}{2} \cdot \frac{1}{W_i}$$

ausgedrückt werden, aber wenn die Bedingungen weniger günstig sind, ist Formel (30) zu benutzen.

Es ist an dieser Stelle nöthig, den Einfluss des Stromverlustes auf den gesammten Wirkungsgrad des Systems der elektrischen Kraftübertragung mit besonderer Berücksichtigung der wirthschaftlich günstigsten Geschwindigkeit des Motors kurz zu betrachten. In Lehrbüchern und Abhandlungen über diesen Gegenstand wird meistens die Annahme gemacht, dass die Isolation der Leitung eine vollständige ist. Dies mag in einigen günstigen Fällen zutreffen, aber eine allgemeine Theorie muss alle Fälle umfassen; man hat daher den Stromverlust in Folge mangelhafter Isolation in Rechnung zu setzen. Soweit dem Verfasser bekannt, ist dies nur von Oliver Lodge in seiner Abhandlung über die Kraftübertragung durch Dynamomaschinen geschehen (The Engineer, 1883). Es gilt auch allgemein der Satz, dass der Wirkungsgrad einer Kraftübertragungsanlage um so grösser ist, je mehr sich die elektromotorische Gegenkraft des Motors der elektromotorischen Kraft des Generators nähert. Es ist bereits im fünften Kapitel (S. 122) ausgeführt, dass dies, selbst wenn die Klemmenspannung des Motors stets konstant bliebe, vollständig falsch ist. Es würde der Fall sein, wenn eine selbstregulirende Dynamomaschine als Generator in der Nähe des Motors aufgestellt und mit ihm durch annähernd widerstandslose und vollkommen isolirte Leitungen verbunden wäre. Aber wenn die Leitungen beträchtlichen Widerstand besitzen und besonders wenn ihre Isolation nicht ganz vollkommen ist, so wird der oben aufgestellte Satz, der beständig von allen spätern Autoren wiederholt wurde, immer sinnwidriger. Aus Gleichung (30) folgt, dass der Stromverlust um so grösser wird, je mehr e_k wächst. Zu gleicher Zeit hat ein Ansteigen von e_k zur Folge, dass der Ankerstrom i vernichtet oder wenigstens geschwächt wird und dass auf diese Weise die dem Motor zugeführte Energie eine Abnahme erfährt. Da nun der auf mangelhafter Isolation beruhende Energieverlust mit zunehmender elektromotorischer Gegenkraft des Motors wächst, während anderseits die von Motor geleistete Arbeit anfangs bis zu einem bestimmten Betrage ansteigt, sodann aber wieder abnimmt, so kann doch augenscheinlich ein hoher Wirkungsgrad nicht erreicht werden, wenn man ein Anwachsen der elektromotorischen Gegenkraft bis zum Betrage der elektromotorischen Kraft des Generators zulässt. Bei der folgenden Untersuchung machen wir nun der Einfachheit wegen die Annahme, dass in der Leitung kein Stromverlust durch mangelhafte Isolation stattfindet. Die Ergebnisse werden daher bis zu einem gewissen Grade ungenau sein, sie lassen sich jedoch durch Anwendung von Formel (30) leicht richtigstellen. Für diesen Fall erhalten wir bestimmte Werthe von J, i und E_k, und der Generator hat die durch diese Werthe bestimmte Stromstärke und Spannung zu liefern. Jetzt nehmen wir an, dass nach einer gewissen Zeit die Isolation der Leitung mangelhaft wird. Hierdurch wird die dem Motor zugeführte elektrische Energie verkleinert und ebenso die von ihm geleistete Arbeit. Augenscheinlich kann dieser Verlust ersetzt werden, indem man den Generator mit höherer Geschwindigkeit laufen lässt, oder mit andern Worten, indem man E_k und J über ihre anfänglichen Beträge anwachsen lässt. Einen ähnlichen Plan befolgen wir auch in der mathematischen Untersuchung. Wir nehmen zunächst an, dass die Isolation der Leitung vollkommen ist, und sind so im Stande, Formeln von grosser Einfachheit zu entwickeln. Dies giebt eine bestimmte Anzahl Bedingungen für den Generator. Wenn dann die Leitung sich wirklich in dem vollkommenen Zustande, wie angenommen, befindet, ist die Aufgabe gelöst. Ist jedoch die Isolation unvollkommen, so verbessern wir die erhaltenen Werthe für E_k und J

mit Hülfe von Formel (30). Dies giebt eine neue Reihe von Bedingungen für den Generator, nach denen seine Triebkraft berechnet werden muss. Die für den Motor gültigen Bedingungen werden dadurch nicht verändert.

Der Spannungsverlust in den Leitungen ist $i W_l$ und muss gleich der Differenz der Klemmenspannungen des Generators und des Motors sein; also

$$E_k = i W_l + e_k.$$

Die im Innern des Generators erzeugte elektrische Energie ist $E_a i$, die im Innern des Motors aufgewandte $e_a i$, und das Verhältnis zwischen diesen beiden Grössen giebt den elektrischen Wirkungsgrad η des gesammten Systems; also

$$\eta = \frac{e_a}{E_a}.$$

Durch Kombination dieses Ausdrucks mit den obigen Gleichungen finden wir demnach

$$\eta = \frac{e_a}{e_a + i(W_l + w_a + w_m + W_a + W_m)} \quad . \; . \; . \quad (31)$$

Wie gross nun auch der Widerstand W_l der Leitung sein mag oder mit andern Worten, auf wie weite Entfernung auch die Energie übertragen werden soll, wir können augenscheinlich immer denselben elektrischen Wirkungsgrad durch passende Veränderung von i und e_a erhalten. Je grösser e_a, die elektromotorische Gegenkraft des Motors, ist, um so höher ist auch der elektrische Wirkungsgrad. Nun giebt es zwei Mittel, durch die wir die elektromotorische Gegenkraft steigern können; einmal nämlich durch Erhöhung der Geschwindigkeit und sodann durch Verwendung von Maschinen, die eine grosse Zahl von Drahtwindungen auf dem Anker haben. Die Anwendung des ersten Mittels ist durch die mechanischen Schwierigkeiten beschränkt, die hohe Geschwindigkeiten im Gefolge haben, und die der zweiten durch die Schwierigkeit, dass der innere Widerstand der Maschinen um so grösser wird, je mehr Windungen auf dem Anker angebracht werden. Dies würde an und für sich das Ergebnis nicht beeinflussen, wenn die elektromotorische Kraft in demselben Maasse wachsen würde, wie der Widerstand der Maschine. Aber dies ist nicht der Fall. Denn nehmen wir zwei vollkommen gleiche Anker an und bewickeln den einen mit vielen Windungen dünnen Drahtes, den andern aber mit einem dickern Drahte, wobei der Wicklungsraum in beiden Fällen genau in derselben Weise ausgenutzt werden soll, so muss das Kupfergewicht auf dem Anker mit dickem Drahte immer etwas grösser sein, da hier der von der Isolation eingenommene Raum kleiner ist. Denn man kann begreiflicher Weise die Dicke der Isolation nicht in derselben Weise verringern, wie den Durchmesser des Drahts. Eine bestimmte geringste Dicke ist für die Umspinnung unbedingt erforderlich, wenn sie überhaupt die nöthige Sicherheit gewähren soll, und dieses ist um so mehr der Fall, wenn der dünnere Draht für Ankerwicklungen mit hoher elektromotorischer Kraft benutzt wird; aus diesem Grunde allein sollte er schon eine bessere Isolation besitzen als der dicke Draht, der bei Ankern für niedrigere elektromotorische Kräfte zur Verwendung kommt. In der Regel muss man eine Umspinnung aus Baumwolle von etwa 0,2 mm Dicke für Drähte von allen Dicken bis zu 3 mm benutzen. Der Durchmesser des umsponnenen Drahtes wird unter diesen Umständen um 0,4 mm grösser als der des blanken Drahtes. Nun lässt sich zeigen, dass die zur Erwärmung des Ankerdrahtes verbrauchte Energie dem verwandten Kupfergewicht umgekehrt proportional ist und dass deshalb bei einem Anker mit dickem Draht dieselbe elektrische Leistung bei geringerm Energieverlust für die Erwärmung des Ankerdrahtes erhalten werden kann. Dasselbe gilt auch für die Wicklung der Feldmagnete. Die mit dickerm Draht bewickelte Dynamomaschine wird deshalb am günstigsten arbeiten, da ihr innerer Widerstand im Verhältnis zur elektromotorischen Kraft kleiner sein wird. Bewickeln wir umgekehrt die Maschinen (Generator und Motor) mit sehr feinem Draht, um mit hoher elektromotorischer Kraft zu arbeiten, so vergrössern sich die Widerstände w_a, w_m, W_a, W_m schneller als die entsprechenden elektromotorischen Kräfte, und wir erhalten, wenn wir von der Leitung absehen, einen geringern Wirkungsgrad der Kraftübertragung. Berücksichtigen wir jetzt den Leitungswiderstand W_l, so arbeitet man um so günstiger, je höher die elektromotorische Kraft ist; es muss daher, wenn wir beides berücksichtigen, einen bestimmten Werth für die elektromotorische Kraft geben, für den der elelektrische Wirkungsgrad ein Maximum wird. Dieser Werth kann für jeden gegebenen Fall gefunden werden, indem wir für Generator und Motor verschiedene Wicklungen annehmen und für diese die entsprechenden elektromotorischen Kräfte und Widerstände berechnen. Wenn man die Ergebnisse der Reihe nach in Gleichung (31) einsetzt und den Leitungswiderstand als gegeben betrachtet, kann man leicht sehen, welcher Fall der günstigste ist.

Diese Ergebnisse sind nur als eine angenäherte Lösung der Aufgabe anzusehen, da wir sie unter Zugrundelegung des höchsten elektrischen Wirkungsgrades erhielten, während es sich in der That um den wirthschaftlichen Wirkungsgrad handelt. Es ist oft behauptet worden, dass der wirthschaftliche Wirkungsgrad von Dynamomaschinen und Motoren in ganz bestimmter Beziehung zu ihrem elektrischen Wirkungsgrade stände, und man könnte demnach den wirthschaftlichen Wirkungsgrad unseres Kraftübertragungssystems erhalten, indem man Gleichung (31) mit einem bestimmten Proportionalitätsfaktor multiplicirte. Es ist jedoch klar, dass der wirthschaftliche Wirkungsgrad eines Motors nicht als eine bestimmte Grösse bezeichnet werden kann, sondern von der geleisteten Arbeit abhängt und um so grösser ist, je mehr sich die vom Motor geleistete Arbeit der maximalen nähert. Diese Beziehung wird am besten in derselben Weise, wie im fünften Kapitel ausgedrückt, indem man annimmt, dass ein bestimmtes Minimum γ der Stromstärke nöthig ist, um die mechanische und magnetische Reibung des Motors zu überwinden, und dass die gesammte Kraft, die der Differenz zwischen diesem Minimum und dem wirklichen Betrage der Stromstärke entspricht, zur Leistung äusserer Arbeit verwendbar ist. In gleicher Weise nehmen wir an, dass ein gewisses Minimum g der Stromstärke multiplicirt mit der Klemmenspannung des Generators die mechanische Energie darstellt, die durch mechanische und magnetische Reibung verbraucht wird. Wir haben deshalb die folgenden Beziehungen:

Generator.

Zugeführte Arbeit $A = (i + g)\, E_a$.

Motor.

Geleistete Arbeit $a = (i - \gamma)\, e_a$.

Setzt man $W_a + W_m = W$ und $w_a + w_m = w$, so ergiebt sich für den Hauptstromgenerator und Hauptstrommotor

$$E_a = e_a + i\,(W_l + W + w)$$

$$A = (i + g)\left(e_a + i\,(W_l + W + w)\right).$$

Der wirthschaftliche Wirkungsgrad des gesammten Systems ist also

$$\eta = \frac{i - \gamma}{i + g} \cdot \frac{e_a}{E_a}$$

oder

$$\eta = \frac{i - \gamma}{i + g} \cdot \frac{e_a}{e_a + i(W_l + W + w)} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (32)$$

Von praktischer Wichtigkeit sind ferner die Bedingungen, unter denen der wirthschaftliche Wirkungsgrad für ein gegebenes System der Kraftübertragung ein Maximum wird. Wie bereits gezeigt, besteht die erste Bedingung hierfür darin, dass man den Generator mit einer so hohen Geschwindigkeit laufen lässt, wie sie in Anbetracht der Betriebssicherheit nur zulässig ist. Wir müssen deshalb annehmen, dass seine Klemmenspannung E_a eine Konstante von möglichst hohem Betrage ist. Die Veränderlichen sind die Stromstärke i und die elektromotorische Gegenkraft e_a des Motors. Wenn wir den Motor zu langsam laufen lassen, so wird die Stromstärke hoch, und wir erhalten einen beträchtlichen Energieverlust durch Erhitzung der Leitung und der beiden Maschinen. Lassen wir den Motor zu schnell laufen, so wird dieser Verlust gering, aber die hohe elektromotorische Gegenkraft wird nur eine geringe Stromstärke zu Stande kommen lassen, sodass auf diese Weise wieder der wirthschaftliche Wirkungsgrad herabgedrückt wird. Zwischen diesen beiden äussersten Fällen muss es augenscheinlich eine Stromstärke und eine elektromotorische Gegenkraft geben, für die der wirthschaftliche Wirkungsgrad ein Maximum wird. Um diese Werthe zu finden, bilden wir die ersten Differentialquotienten des Wirkungsgrades nach i und e_a und setzen diese gleich Null. So finden wir die günstigste Stromstärke durch die Gleichung

$$\frac{d\eta}{di} = 0,$$

und die günstigste elektromotorische Gegenkraft durch die Gleichung

$$\frac{d\eta}{de_a} = 0.$$

Setzen wir der Kürze wegen E statt E_a, e statt e_a und W statt der Summe der Widerstände $W_l + W + w$, so giebt die erste Gleichung

$$(i + g)(E - 2\,Wi + \gamma\,W) - i(E + \gamma\,W) + Wi^2 + \gamma\,E = 0,$$

wo i die einzige unkekannte Grösse ist. Durch Auflösung dieser Gleichung für i ergiebt sich

$$i = -g \pm \sqrt{g^2 + \frac{E}{W}(g+\gamma) + g\gamma} \quad . \quad . \quad . \quad (33)$$

Man sieht, die Gleichung ergiebt zwei Werthe für i, einen positiven und einen negativen. Der letztere besagt, dass der Strom in entgegengesetzter Richtung fliesst; alsdann würde der Motor Generator werden und umgekehrt. Diesen Fall können wir jedoch von unserer Betrachtung ausschliessen; der Motor müsste hier grösser als der Generator sein, eine Anordnung, wie sie in der Praxis wohl nicht getroffen wird. Wir haben deshalb nur mit der positiven Wurzel zu rechnen und setzen demnach

$$i = -g + \sqrt{g^2 + \frac{E}{W}(g+\gamma) + g\gamma} \quad . \quad . \quad . \quad (34)$$

Nachdem wir auf diese Weise i bestimmt haben, finden wir die elektromotorische Gegenkraft des Motors

$$e = E - Wi \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (35)$$

Um also das Maximum des wirthschaftlichen Wirkungsgrades zu erhalten, muss dem Motor eine solche Geschwindigkeit ertheilt werden, dass seine elektromotorische Gegenkraft den Werth $E - Wi$ erhält.

Benutzen wir die Gleichung $\frac{d\eta}{de} = 0$, so können wir auch direkt die günstigste elektromotorische Gegenkraft erhalten. Die Lösung giebt wieder zwei Werthe für e, von denen der eine kleiner als E und der andere grösser als E ist. Letzterer entspricht dem Falle, wenn Motor und Generator ihre Rollen vertauscht haben und braucht aus den oben angeführten Gründen nicht weiter betrachtet zu werden. Der erste Werth von e ist allein von Wichtigkeit; er ist gegeben durch die Formel

$$e = E + Wg - \sqrt{(E + Wg)^2 - (E + Wg)(E - W\gamma)} \quad . \quad . \quad (36)$$

Aus der Gleichung geht nicht deutlich hervor, dass e in allen Fällen kleiner als E sein muss, aber wenn wir den Ausdruck unter dem Wurzelzeichen auf der rechten Seite entwickeln, erhalten wir

$$e = E + Wg - \sqrt{W^2 g^2 + W^2 g \gamma + EW(g + \gamma)}\,, \quad . \quad (37)$$

eine Formel, die sich auch durch Einsetzung von

$$i = \frac{E - e}{W}$$

in Gleichung (34) ergiebt.

Augenscheinlich muss die Quadratwurzel in (37) unter allen Umständen numerisch grösser als Wg sein, und deshalb e stets kleiner als E. Nun findet nach der gewöhnlichen Theorie der Lehrbücher das Maximum des wirthschaftlichen Wirkungsgrades statt, wenn $E = e$ ist. Dies könnte nur der Fall sein, wenn $g = 0$ und $\gamma = 0$ wäre; das heisst, wenn der Betrieb der Dynamomaschine bei offenem äussern Stromkreise keine Arbeit erforderte und wenn der Motor ohne Verbrauch elektrischer Energie leer laufen könnte. Diese beiden Bedingungen sind offenbar nicht zu erfüllen.

Da die Formeln (32) bis (37) etwas verwickelt sind, sollen sie an der Hand eines praktischen Beispiels erläutert werden.

Wir wollen annehmen, dass ein Generator für eine elektrische Kraftübertragung von gegebener Ausführung mit einer Maximalleistung von 1000 V und 20 A angewandt wird und dass er unter diesen Umständen einen wirthschaftlichen Wirkungsgrad von 80 % hat. Sein innerer Widerstand sei 5 Ohm. Seine Klemmenspannung bei der Maximalleistung würde dann

$$1000 - 20 \times 5 = 900 \text{ V}$$

sein. Um 900 V und 20 A mit einer Maschine von 80 % Wirkungsgrad zu leisten, ist ein Aufwand von $18\,000 \times \frac{100}{80} = 22\,500$ Watt nöthig. Von diesem Betrage stellen 20 000 Watt die innere, im Anker entwickelte elektrische Energie dar, während 2500 Watt zur Ueberwindung der mechanischen und magnetischen Reibung der Dynamomaschine verwandt werden. Bei 1000 V entspricht dieser Energie ein Strom von 2,5 A. Eine ähnliche Betrachtung mag für den Motor 1,5 A ergeben, so dass wir $g = 2{,}5$ und $\gamma = 1{,}5$ zu setzen haben.

Nehmen wir nun an, die Entfernung zwischen Generator und Motor sei 1,5 km und die Leitung bestehe aus Kupferdraht von 2,5 mm Durchmesser und habe einen Widerstand von 6,2 Ohm. Setzen wir 3 Ohm für den Widerstand des Motors fest, dann ist

$$W = 14{,}2 \text{ Ohm}.$$

Dies sind die Zahlen, die nöthig sind, um die Stromstärke und die elektromotorische Gegenkraft für den maximalen Wirkungsgrad zu finden. Gleichung (34) giebt sofort

$$i = 14{,}5 \text{ A}$$

und (35) oder (36) giebt

$$e = 790 \text{ V}.$$

Der maximale wirthschaftliche Wirkungsgrad, den wir unter diesen Umständen erhalten können, ist nach Gleichung (32)

$$\eta = \frac{14{,}5 - 1{,}5}{14{,}5 + 2{,}5} \cdot \frac{790}{1000} = 60\,\%.$$

Unter der Annahme nun, dass der Generator auf einer Geschwindigkeit gehalten wird, die seiner maximalen Leistung von 1000 V entspricht, müssen wir, um den höchst möglichen Betrag von 60 % der aufgewandten Arbeit zurückzuerhalten, den Motor so konstruiren und ihm eine solche Geschwindigkeit ertheilen, dass in ihm eine elektromotorische Gegenkraft von 790 V erzeugt wird. Die Stromstärke wird dann 14,5 A betragen, und die Effektabgabe des Motors ist

$$\frac{790}{736}(14{,}5 - 1{,}5) = 14 \text{ P}.$$

Um zu zeigen, wie eine Abweichung von diesen Bedingungen den Wirkungsgrad und die an der Riemenscheibe des Motors verfügbare Leistung beeinflusst, ist die folgende Tabelle hinzugefügt.

Elektromotorische Gegenkraft	Stromstärke	Wirthschaftl. Wirkungsgrad %	Am Motor verfügbare Leistung in P
790	14,5	60,0	14,0
876	8,0	54,0	7,7
716	20,0	58,6	18,0

Ein Blick auf diese Tabelle zeigt, dass der Wirkungsgrad für Stromstärken, die entweder grösser oder kleiner als 14,5 A sind, kleiner als 60 % ist, dass sich aber die Abnahme desselben auf wenige Procent beschränkt, wenn sich auch die übertragene Energie, erheblich verändert. Dies ist eine sehr werthvolle Eigenschaft der elektrischen Kraftübertragung; sie erlaubt eine Veränderung der Leistung in weiten Grenzen ohne erhebliche Abnahme des Wirkungsgrades. Die grosse Bedeutung dieses Umstandes tritt noch mehr hervor, wenn wir die elektrische Kraftübertragung mit der hydraulischen vergleichen. Bei dieser verbraucht der Motor stets das gleiche Quantum Wasser, wie gross auch die geleistete Arbeit ist, und da der Druck konstant bleibt, so ist der Wirkungsgrad sehr niedrig, wenn der Motor unter seiner normalen Belastung arbeitet.

Das System der Kraftübertragung vermittelst zweier Hauptstrommaschinen besitzt ferner den Vorzug, dass sich die Geschwindigkeit des Motors selbst regulirt. Wir haben gezeigt, wie ein mit konstantem Strom betriebener Motor so gebaut werden kann, dass er bei jeder Belastung mit derselben Geschwindigkeit läuft. Dasselbe lässt sich auch für einen Motor erreichen, der dazu bestimmt ist, bei konstanter Spannung zu arbeiten. Im ersten Fall muss die

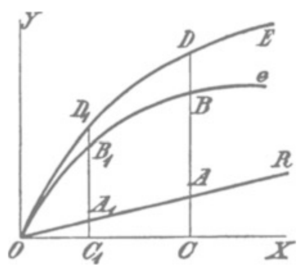


Fig. 69.

Spannung steigen, wenn die Belastung wächst, im zweiten Fall muss die Stromstärke zunehmen, wenn die Belastung erhöht wird, während die eine oder die andere dieser Grössen an der Erzeugungsstation konstant gehalten wird. Aber bei der Hauptstrommaschine ist weder Stromstärke noch Spannung konstant, sondern beide ändern sich, wobei sie gegenseitig von einander abhängen. Es scheint daher auf den ersten Blick, als ob dadurch die Selbstregulirung des Motors erheblich erschwert wäre. Dies ist jedoch nicht der Fall, da dieselben Eigenschaften, die bei der Dynamomaschine in dieser Beziehung hindernd auftreten, beim Motor im umgekehrten Sinne wirken.

In Fig. 69 möge OE die gewöhnliche Charakteristik des Hauptstromgenerators vorstellen; die Kurve soll für eine bestimmte Geschwindigkeit, z. B. 1000 Umdrehungen in der Minute, gezeichnet sein. Oe mag die Charakteristik des Motors ebenfalls für 1000 Umdrehungen darstellen. Die elektromotorische Gegenkraft, die im Anker des Motors bei dieser Geschwindigkeit entsteht, wird also durch die Ordinaten der Kurve Oe bezeichnet. So möge der Stromstärke OC eine entgegengesetzt gerichtete elektromotorische Kraft CB entsprechen, der Stromstärke OC_1 eine elektromotorische Kraft $C_1 B_1$ u. s. w. In der Dynamomaschine sind die den Stromstärken OC und OC_1 entsprechenden elektromotorischen Kräfte CD und $C_1 D_1$. Zieht man OR unter einem solchen Winkel gegen die Horizontale, dass die trigonometrische Tangente desselben den numerischen Werth der Summe der Widerstände $(W + w + W_l)$ der Dynamomaschine, des Motors und der Leitung bedeutet, so ist der Spannungsverlust in diesen Widerständen für die Stromstärke OC durch CA dargestellt, für die Stromstärke OC_1 durch $C_1 A_1$ u. s. w. Die Ordinaten zwischen den Graden OR und der Charakteristik OE sind deshalb die entsprechenden elektromotorischen Gegenkräfte, die bei den verschiedenen Stromstärken im Anker des Motors erzeugt werden müssen. Ist die Stromstärke OC, so ist die elektromotorische Gegenkraft AD; ist erstere OC_1, so ist letztere $A_1 D_1$ u. s. w. Nun ist die elektromotorische Gegenkraft des Motors, wenn er mit der konstanten Geschwindigkeit von 1000 Umdrehungen in der Minute läuft, durch die Kurve Oe gegeben, und es müssen daher die Ordinaten dieser Kurve für jede Stromstärke gleich den zwischen OR und OE enthaltenen Ordinaten sein; der Motor folgt demnach vollkommen den Anforderungen des Generators und läuft mit konstanter Geschwindigkeit. Er wird mit dieser Geschwindigkeit laufen, ob nun die Stromstärke OC_1 oder OC ist, vorausgesetzt, dass $C_1 A_1 = B_1 D_1$ und $CA = BD$ ist.

Man muss deshalb den Motor und die Dynamomaschine sorgfältig auswählen, so dass ihre Charakteristiken so gut wie möglich in der beschriebenen Weise zu einander passen. Unter diesen Umständen regulirt sich das System ohne besondere Vorsichtsmaassregeln und Hülfsmittel selbst. Sollten die Charakteristiken nicht über ihren ganzen Verlauf die Bedingung erfüllen, dass $CA = BD$ ist, so wird es in der Regel nicht schwer sein, zwei hinreichend von einander entfernte Punkte C_1 und C zu finden, für welche diese Bedingung gilt und zwischen denen die Abweichung der beiden Kurven von einander sehr geringfügig ist. Das System wird deshalb innerhalb dieser Grenzen annähernd selbstregulirend sein. Der

Verfasser hatte Gelegenheit, die Richtigkeit dieser Theorie zu prüfen. Er benutzte die elektrische Kraftübertragung, um die Modellwerkstätte einer Maschinenfabrik mit Energie zu versorgen, da eine mechanische Uebertragung in diesem Fall ausgeschlossen war. Die für die Holzbearbeitungsmaschinen einschliesslich der Band- und Kreissägen nöthige Energie ist in dieser Werkstätte natürlich zu verschiedenen Zeiten äusserst verschieden, und es war von der grössten Wichtigkeit, die Hauptwelle, von der die einzelnen Werkzeugmaschinen durch Riemen betrieben wurden, auf konstanter Umdrehungsgeschwindigkeit zu halten. Dies wurde durch die soeben beschriebene Methode erreicht. Als Generator diente eine Bürgin'sche Dynamomaschine, die von der Hauptmaschine in einem andern Theile der Fabrik mit konstanter Geschwindigkeit angetrieben wurde; der Motor war gleichfalls eine Bürgin'sche Dynamomaschine, aber für niedrigere Spannung gewickelt. Der Unterschied zwischen den beiden Charakteristiken OE und Oe (Fig. 69) war bedeutend, und um zwei Punkte C_1 und C zu finden, für die die Bedingung $CA = BD$ galt, musste die Neigung der Graden OR durch Einschaltung eines Widerstandes in den Stromkreis vergrössert werden.

Diese Einrichtung brachte allerdings einen kleinen Energieverlust mit sich, aber sie war keineswegs ein Fehler des Systems. Es lag dies einfach daran, dass man gezwungen war, zwei zufällig vorräthige Dynamomaschinen zu benutzen. Wenn die Maschinen eigens zu diesem Zweck konstruirt wären, hätte man keinen Widerstand einzuschalten brauchen.

Ferner ist diese Methode, bei elektrischen Kraftübertragungen die Geschwindigkeit des Motors konstant zu halten, sehr häufig von C. E. L. Brown in verschiedenen Anlagen der Maschinenfabrik Oerlikon angewandt worden. Durch sorgfältige Konstruktion der Dynamomaschinen hat es Brown erreicht, dass die grössten Schwankungen des Motors bei Leerlauf und voller Belastung nur 2 % betrugen.

Gleich gute Erfolge hat in dieser Hinsicht auch v. Dolivo-Dobrowolsky bei einer Kraftübertragungsanlage in den Werkstätten der Allgemeinen Elektricitäts-Gesellschaft zu Berlin erzielt. Die Selbstregulirung ist hier bei den grössten Schwankungen in der Belastung so vollkommen, dass sie als bester Beweis für die Richtigkeit der oben angeführten Theorie dienen kann. Die Anlage besteht aus einem Generator vom Typus der Edison'schen Maschinen für eine Leistung von 20000 Watt bei einer normalen Stromstärke von 25 A, einem Motor von demselben Typus und einer beide Maschinen verbindenden Leitung von 1,25 Ohm Widerstand. Der Generator wird mit 1000 Umdrehungen in der Minute betrieben, der Motor mit 885. Die Hauptabmessungen der Eisentheile der Maschinen sind aus Fig. 70 zu ersehen. Die ausgezogenen Linien beziehen sich auf den Generator, die punktirten auf den Motor. Die Magnet-

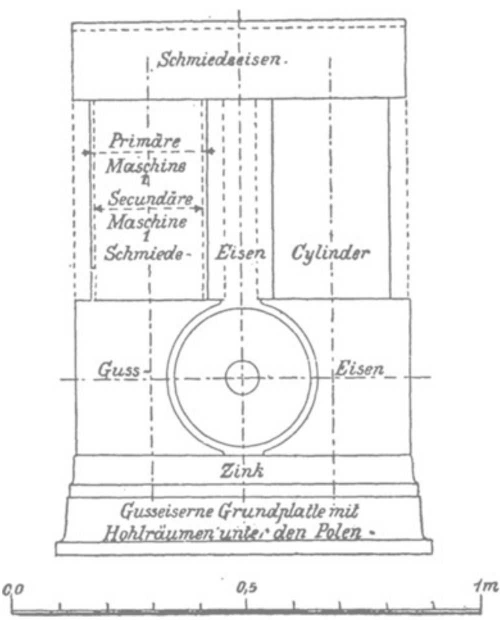


Fig. 70.

kerne des letztern haben etwas geringern Durchmesser; ebenso ist das Joch leichter gehalten. Der Ankerkern hat in beiden Maschinen einen Durchmesser von 295 mm und eine Länge von 325 mm; aber während die Papierisolation beim Generator nur 5 % des Ankervolumens einnimmt, beträgt der durch Papier ausgefüllte Raum beim Motor 25 %. Die Ankerwicklung ist in beiden Maschinen dieselbe und besteht aus 780 äussern Leitern, deren Widerstand gleich 0,657 Ohm ist. Die Magnetwicklung des Motors und Generators enthält je 553 Windungen auf jedem Schenkel. Ihr Widerstand beträgt beim

Generator 1,53 Ohm und beim Motor 1,44 Ohm. Der kleinere Widerstand der Magnetwicklung des Motors rührt vom geringern Durchmesser der Magnetkerne her. Parallel zur Magnetwicklung ist beim Generator ferner ein Nebenschluss von 20 Ohm angebracht, der bifilar gewickelt ist und daher keine Selbstinduktion besitzt. Durch die Anordnung eines solchen Nebenschlusses kann begreiflicher Weise leicht ein kleiner Fehler, der bei der Konstruktion der Maschinen begangen ist, aufgehoben und so eine bessere Uebereinstimmung der Charakteristiken der Maschinen erzielt werden; aber nach den Angaben von Dolivo-Dobrowolsky leistet der Nebenschluss noch mehr: er vergrössert nämlich die Schnelligkeit, mit der die eine Maschine den Veränderungen der andern folgt. Wenn die Belastung des Motors plötzlich verringert wird, so sinkt die Stromstärke in demselben Augenblicke; aber derartige plötzliche Veränderungen des

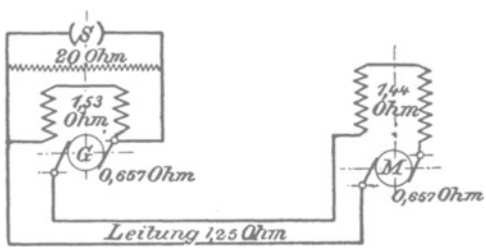


Fig. 71.

die Feldmagnete umkreisenden Stromes werden durch den Einfluss der Selbstinduktion verzögert. Das System hat daher eine gewisse Neigung zu Unregelmässigkeiten in der Geschwindigkeit; sie rührt von einem Hinundherwogen der Energie zwischen den beiden Maschinen her, das je nach dem Grade der Störung nach kürzerer oder längerer Zeit verschwinden wird. Durch die Anordnung, die wie eine Art von elektromagnetischem Dämpfer wirkt, wird der von den Magneten ausgehende Stromstoss grössten Theils durch den Nebenschluss aufgenommen, und die Maschinen sind dadurch in den Stand gesetzt, schneller ihren gleichförmigen Lauf wieder aufzunehmen.

Fig. 71 zeigt schematisch die Anordnung des Stromkreises. Da die Isolation durchschlagen werden könnte, wenn der Stromkreis durch einen gewöhnlichen Schlüssel unterbrochen würde, so geschieht dies durch einen besondern Schlüssel *S*, der mit den Enden der Wicklung der Feldmagnete verbunden ist. Durch Schliessung dieses

Stromunterbrechers wird der Magnetismus der Schenkel zum Verschwinden gebracht und der Strom auf diese Weise allmählich unterbrochen. Ein Fig. 72 abgebildeter Flüssigkeitsrheostat dient

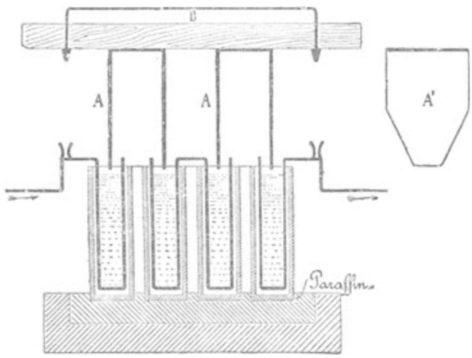


Fig. 72.

dazu, den Motor anzuhalten. Er besteht aus einer Reihe von Gefässen mit fünfprocentiger Sodalösung, in die Eisenelektroden *A*

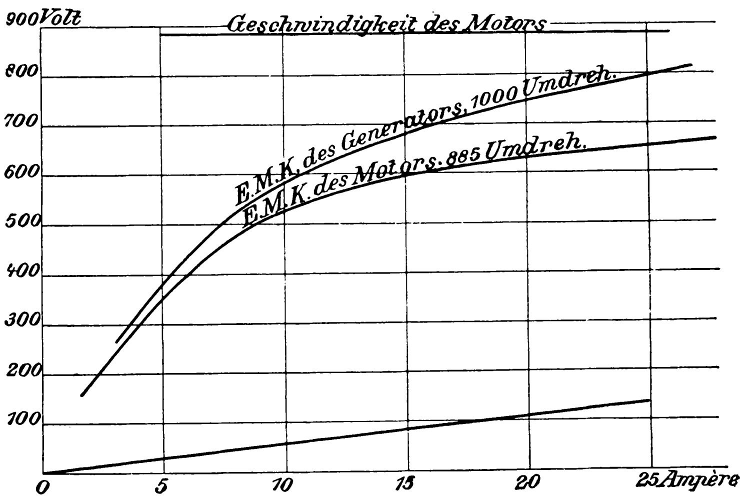


Fig. 73.

tauchen; diese sind durch einen Balken *B* untereinander verbunden und können mit Hülfe eines Zahngetriebes, das durch eine Kurbel verstellbar ist, gehoben oder gesenkt werden. Die Elektroden haben die Gestalt A'. In den Gefässen sind, wie aus der Figur zu ersehen, Eisenstreifen angebracht, die an jedem Ende des Apparates mit federnden Kontakten versehen sind; wenn die beweglichen Elektroden ganz herabgelassen sind, werden sie durch diese federnden Kontakte kurz geschlossen. Um ein Emporsteigen der Lösung an den Eisenplatten zu verhüten, sind diese oben mit dickflüssigem Mineralöl bestrichen. Das Eisen wird durch den Strom nicht angegriffen. Für Spannungen bis zu 200 V aufwärts werden Flüssigkeitsrheostaten mit nur zwei Gefässen, für Spannungen bis zu 800 V solche mit vier Gefässen benutzt.

Die Kurven in Fig. 73 zeigen die Ergebnisse von Versuchen, die an dieser Kraftübertragungsanlage angestellt wurden. Die geneigte Grade bezeichnet den Spannungsverlust, der dem Widerstande des Stromkreises entspricht, und die beiden Kurven sind die Charakteristiken des Generators und des Motors. Die Linie am obern Rande der Figur stellt die Geschwindigkeit des Motors dar, wie sie bei verschiedenen Stromstärken wirklich beobachtet wurde.

Siebentes Kapitel.

Bedeutung des Wechselstroms für Kraftübertragungen auf weite Entfernungen. — Elektromotorische Kraft der Wechselstrommaschinen. — Effektive Spannung und effektive Stromstärke. — Vektordiagramm. — Selbstinduktion. — Leistung. — Verschiedene Methoden für die Messung der Leistung.

Bisher haben wir uns nur mit dem Gleichstrom beschäftigt, der im Anfang allein für elektrische Kraftübertragungen angewendet wurde. Als sich jedoch die Elektrotechnik weiter entwickelte, sah man allmählich ein, dass sich auch Elektromotoren mit Wechselstrom treiben lassen; in den letzten Jahren hat sogar die Kraftübertragung mittels Wechselstroms grössere Fortschritte gemacht als die ältere Gleichstrommethode.

Zu dieser Entwicklung haben besonders zwei Ursachen beigetragen. Einmal war man nämlich bestrebt, die Rentabilitat der bestehenden Wechselstromcentralen, die nur zur Beleuchtung dienten, dadurch zu erhöhen, dass man auch Strom für motorische Zwecke abgab; sodann wuchsen die Kraftübertragungsanlagen über die Grenzen hinaus, innerhalb derer man sie noch mit Gleichstrom betreiben konnte. So baute man einmal Wechselstrommotoren von kleiner und mittlerer Leistung, die sich an die Vertheilungsnetze der Städte anschliessen liessen, während man anderseits grosse Wechselstrommaschinen konstruirte und Einrichtungen traf, welche die Kraftübertragung auf weite Entfernung mittels hochgespannter Wechselströme möglich machten.

Man fragt vielleicht, weshalb hierfür nicht ebenso gut Gleichstrom benutzt werden kann. Hauptsächlich liegt das daran, dass man keine Gleichstrommaschinen bauen kann, die die nöthige Isolation für so hohe Spannungen besitzen. Wie wir oben gezeigt haben, wächst die Betriebsspannung, wenn der Wirkungsgrad derselbe bleiben soll, mit dem Widerstande der Leitung, also auch mit der Entfernung, auf welche die Energie zu übertragen ist. Denn wollte man den Widerstand der Leitung dadurch herabsetzen, dass man den Querschnitt vergrösserte, so würde das Anlagekapital so gross werden, dass sich die elektrische Kraftübertragung wirthschaftlich nicht mehr lohnte. Man muss folglich mit Zunahme der Entfernung die Spannung vergrössern und gelangt alsdann bald an die Grenze, wo man keine Gleichstrommaschinen wegen ihres Kommutators mehr anwenden kann. Denn die Oberfläche des Kommutators muss nothwendigerweise blank sein, damit der Strom zu den Bürsten gelangen kann; bei höhern Spannungen sind daher Kurzschlüsse zwischen den einzelnen Segmenten unvermeidlich. Maschinen, die ohne besondere Vorsichtsmaassregeln, aber mit Sorgfalt gebaut sind, lassen sich noch ohne Gefahr bis zu 2000 und selbst 3000 Volt

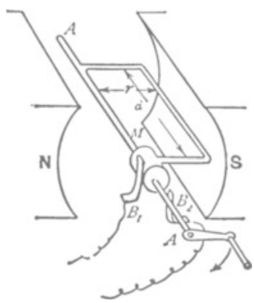


Fig. 74.

gebrauchen. Wendet man besondere Konstruktionen an und isolirt den Anker und Kommutator vollständig von der Achse, die Feldmagnete von der Grundplatte und diese wieder vom Fundament, so kann man bei ganz sorgfältiger Ausführung selbst noch höhere Spannungen mit Gleichstrommaschinen erzielen. Aber in Folge davon werden auch die Kosten wieder höher, und man kommt trotzdem nie zu solchen Spannungen, wie man sie ohne Schwierigkeit mit Wechselstrommaschinen erreicht. Diese besitzen überhaupt keinen Kommutator und brauchen nicht einmal mit hoher Spannung zu arbeiten, da man die Spannung mittels Transformatoren beliebig steigern oder herabsetzen kann.

Im Folgenden wollen wir die Theorie der Wechselstrommaschine kurz darlegen. Ein ideales Bild derselben haben wir in Fig. 13 gegeben, die hier wieder reproducirt werden möge. Die elektromotorische Kraft, die in dem gleichförmigen Felde F inducirt wird, ist

$$E = F\, l\, \omega \sin \alpha,$$

wo ω die lineare Geschwindigkeit bedeutet, mit der sich der Leiter von der Länge l im Felde von der Stärke F bewegt. Der Bequemlichkeit halber wollen wir die Dimensionen und die Umdrehungszahl der Spule in die Formel einführen. Macht die Spule in einer Sekunde N Umdrehungen, so ist

$$\omega = 2\, \pi\, r\, N,$$

$$E = 2\, \pi\, r\, N\, F\, l \sin \alpha.$$

Da F die Feldstärke bezeichnet, also die Anzahl der Kraftlinien, die auf ein Quadratcentimeter kommen, so ist $F\, l\, r$ gleich dem gesammten Induktionsfluss, der durch die Ebene der Windung geht, wenn diese auf der Richtung des Feldes senkrecht steht, α also gleich 0 ist. Setzen wir

$$F\, l\, r = z,$$

so ist

$$E = 2\, \pi\, N z \sin \alpha.$$

Es ist dies der Ausdruck für die momentane elektromotorische Kraft einer Spule mit einer Windung und zwei wirksamen Leitern; er wird ein Maximum für $\alpha = {}^1/_2\, \pi$, also zu der Zeit, wo die Ebene der Spule den Kraftlinien parallel ist. Nun besitzt eine Spule von zwei Windungen vier wirksame Leiter und allgemein eine Spule von ${}^1/_2\, \nu$ Windungen ν wirksame Leiter, so dass wir für eine solche erhalten

$$E = \nu\, \pi\, N z \sin \alpha.$$

Da sich α zwischen 0 und $2\,\pi$ ändert, so erhalten wir für die elektromotorische Kraft periodisch wechselnde Werthe: ein positives Maximum für $\alpha = {}^1/_2\, \pi$, Null für $\alpha = \pi$, ein negatives Maximum für $\alpha = {}^3/_2\, \pi$ und Null für $\alpha = 2\, \pi$.

Graphisch lässt sich diese Aenderung der elektromotorischen Kraft durch ein *Vektordiagramm* darstellen, indem man die Grade OE (Fig. 75), die sich N mal in der Sekunde um ihren einen Endpunkt O dreht, auf die Ordinatenachse projicirt. Die Projektion Oe ist alsdann in jedem Augenblick ein Maass für die elektromotorische Kraft, wenn wir den Winkel α von der horizontalen

Achse aus zählen. Die Stromstärke lässt sich natürlich in ähnlicher Weise darstellen, wenn sie sich wie eine Sinusfunktion ändert, wenn also

$$i = I \sin \alpha$$

ist, wo i den momentanen und I den maximalen Werth bezeichnet.

Denken wir uns, dass an den Klemmen unserer idealen Wechselstrommaschine ein Hitzdraht-Spannungsmesser anliegt, so wird dieser von einem Strome durchflossen, dessen Stärke der elektromotorischen Kraft proportional ist. Die gesammte Energie, die während einer Periode von der Dauer $T = 1/N$ in Wärme umgesetzt wird, ist in diesem Falle

$$\frac{E^2}{W} \int_0^T \sin^2 \alpha \, dt,$$

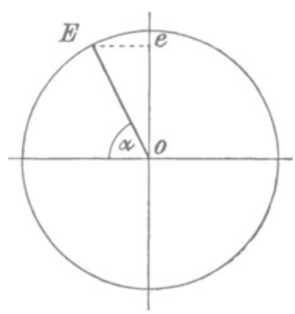


Fig. 75.

wenn E den maximalen Werth der elektromotorischen Kraft und W den Widerstand des Spannungsmessers bezeichnet. Da $\alpha = 2\pi N t$, so lässt sich das Integral auch in folgender Form schreiben

$$\frac{E^2}{2\pi N W} \int_0^T \sin^2 (2\pi N t) \, . \, d(2 N t).$$

Multipliciren wir mit N, so erhalten wir für die Energie, die in einer Sekunde in Wärme verwandelt wird:

$$a = \frac{E^2}{2\pi W} \int_0^T \sin^2 (2\pi N t) \, . \, d(2 N t).$$

Nun ist

$$\int \sin^2 \alpha \, d\alpha = \frac{1}{2} \alpha - \frac{1}{2} \sin \alpha \cos \alpha ,$$

und daher

$$a = \frac{E^2}{2 \pi W} \frac{2 \pi}{2} = \frac{E^2}{2 W}.$$

Wäre derselbe Spannungsmesser mit den Klemmen einer Gleichstrommaschine verbunden, welche die elektromotorische Kraft e besitzt, so erhielte man für die in Wärme umgesetzte Energie

$$a = \frac{e^2}{W}.$$

Beide Maschinen geben also dieselbe Ablenkung am Spannungsmesser oder dieselbe Lichtmenge in einer Glühlampe, wenn

$$e^2 = \frac{E^2}{2}$$

oder

$$e = \frac{E}{\sqrt{2}}. \quad \ldots \ldots \ldots \quad (38)$$

Die Spannung, die ein derartiger Spannungsmesser angiebt und die sich zu der maximalen Spannung wie $1 : \sqrt{2}$ verhält, bezeichnet man als *effektive Spannung.*

Wir können nun die effektive Spannung unserer idealen Wechselstrommaschine mit der Spannung vergleichen, die eine Gleichstrommaschine bei derselben Geschwindigkeit, gleicher Feldstärke und gleicher Zahl der wirksamen Ankerwindungen hervorbringt.

Die effektive elektromotorische Kraft der Wechselstrommaschine ist

$$e_w = \frac{1}{\sqrt{2}} \pi z \nu N$$

und die elektromotorische Kraft der Gleichstrommaschine

$$e_g = z \nu N.$$

Beide verhalten sich wie $\frac{\pi}{\sqrt{2}} : 1$; es gilt daher annähernd die Beziehung

$$e_w = 2{,}22 \, e_g .$$

Wollen wir also die Spannung einer Wechselstrommaschine bestimmen, so rechnen wir gerade so, als ob wir es mit einer Gleichstrommaschine zu thun hätten, und multipliciren das Resultat mit 2,22. Dies trifft jedoch genau nur bei solchen Wechselstrommaschinen zu, wo sich die elektromotorische Kraft vollständig wie eine Sinusfunktion ändert. Gewöhnlich ist dies jedoch nicht der Fall, so dass sich der Koefficient im Allgemeinen etwas von 2,22 unterscheidet. Wir wollen ihn mit K bezeichnen und setzen

$$e_w = K z \nu N.$$

K hängt in ziemlich engen Grenzen von der Form und Anordnung der Ankerspulen und Polschuhe ab und liegt bei den meisten neuern und bessern Maschinen zwischen 2,00 und 2,30. In einigen Fällen, besonders bei gezähnten Ankern, deren Spannung durch eine sehr spitz verlaufende Kurve dargestellt wird, kann K gleich 2,60 werden.

Die obige Formel gilt für die Spannung einer zweipoligen Wechselstrommaschine. Sind mehr Pole vorhanden und werden die Ankerspulen hintereinander verbunden, so wird die elektromotorische Kraft entsprechend vergrössert. Hat die Maschine z. B. 2 p Pole und macht sie n Umdrehungen in der Minute, also $\frac{n}{60}$ in der Sekunde, so ist die Anzahl der Perioden, die die elektromotorische Kraft in einer Sekunde erfährt, gleich $p\frac{n}{60}$ oder

$$N = \frac{pn}{60}.$$

Setzen wir diesen Werth in die obige Formel ein, so erhalten wir

$$e_w = K z n p \frac{n}{60}.$$

Hier ist die elektromotorische Kraft im absoluten Maass ausgedrückt; wollen wir sie in Volt ausdrücken, so multipliciren wir die rechte Seite mit 10^{-8} und erhalten

$$e_w = K z \nu p \frac{n}{60} \times 10^{-8} \text{ Volt.} \quad \dots\dots \quad (39)$$

In dieser Formel ist z in absoluten Einheiten einzusetzen; es bezeichnet die Summe der Kraftlinien, welche eine Spule abwechselnd von der einen und von der entgegengesetzten Seite durchsetzen. Wechselt der Induktionsfluss nicht zwischen $+z$ und $-z$, sondern, wie bei den Mordey'schen Maschinen, zwischen $+z$ und 0, so erhält man offenbar für die elektromotorische Kraft nur die Hälfte des in der Formel angegebenen Werthes. Ferner ist zu beachten, dass ν nicht die Windungszahl des Ankers, sondern die Anzahl aller wirksamen Leiter bezeichnet.

Wir wollen nun die Leistung eines Wechselstroms untersuchen. Beim Gleichstrom war die Sache sehr einfach: wir hatten nur die Anzahl der Ampère mit der Zahl der Volt zu multipliciren und erhielten die Zahl der geleisteten Watt. Bei einem Wechselstrom geht dies nicht an, weil die Stromkurve in der Regel nicht mit der Kurve der elektromotorischen Kraft zusammenfällt. Um dies zu erklären, wollen wir annehmen, wir hätten einen Stromkreis (Fig. 76),

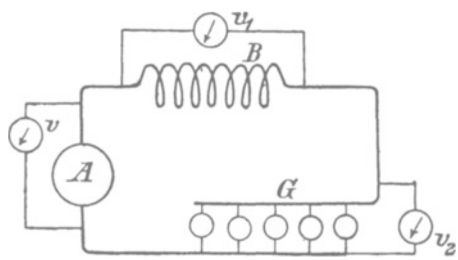


Fig. 76.

in dem eine Wechselstrommaschine A, ein Elektromagnet B und ein Satz Glühlampen G eingeschaltet sind. v, v_1 und v_2 seien elektrostatische Spannungsmesser, in denen also nur ein ganz schwacher Strom fliesst. Der Widerstand w der Lampen sei so gross, dass der des übrigen Theiles des Stromkreises dagegen verschwinden soll. Ferner nehmen wir an, dass der Kern der Spule aus Eisendrähten besteht, deren Magnetismus der erregenden Kraft augenblicklich folgt, und dass bei dem Magnetisirungsprocess keine merkliche Energiemenge verloren geht.

Die Spule verhält sich alsdann zu dem von ihrem eignen Strome erzeugten Felde gerade so, wie die Ankerspule unserer idealen Wechselstrommaschine (Fig. 74) zu ihrem Magnetfelde. Hier war die elektromotorische Kraft Null, wenn die Ebene der Spule auf den Kraftlinien rechtwinklig stand und der die Spule durchsetzende Induktionsfluss ein Maximum war; nach einer Drehung um 90^0 erreicht die elektromotorische Kraft ihren maximalen Werth. Bezeichnet man mit F den gesammten Induktionsfluss, der entsteht, wenn der Strom in der Spule des Elektromagnets seinen maximalen Werth J erreicht, und mit ν die Anzahl der Windungen auf dieser Spule, so erhalten wir für das Maximum der elektromotorischen Kraft in der Spule

$$E_s = 2\,\pi\,\nu\,N\,F,$$

wo N die *Periodenzahl* (Frequenz), also $2\,N$ die *Wechselzahl* des Wechselstroms bedeutet. Die elektromorische Kraft der Spule oder ihre *Selbstinduktion* erreicht dies Maximum, wenn der Strom und der dadurch erzeugte Induktionsfluss durch Null hindurchgeht. Nun ist der Induktionsfluss F eine Funktion der Stromstärke I und kann sogar, wenn der Kern des Elektromagnets nicht zu stark magnetisirt wird, sodass nicht mehr als 5000 bis 6000 Kraftlinien auf das Quadratcentimeter kommen, für den ganzen Cyklus der Stromstärke I proportional gesetzt werden. Wir können daher auch

$$F = \frac{4\,\pi\,\nu}{l}\,I\,q\,\mu$$

setzen, wo l die Länge, q den Querschnitt und μ die Permeabilität des magnetischen Kreises bedeutet. Setzen wir

$$L = \frac{4\,\pi\,\mu\,p\,\nu^2}{l},$$

so erhalten wir

$$E_s = 2\,\pi\,N\,L\,I.$$

In dieser Formel sind I und E_s in absoluten Einheiten ausgedrückt. Wünschen wir sie in Ampère und Volt zu erhalten, so müssen wir links mit 10^8 und rechts mit 10^{-1} multipliciren und bekommen

$$E_s = 2\,\pi\,N\,L\,I \times 10^{-9} \text{ Volt}.$$

L nennt man den *Selbstinduktionskoefficienten;* er hat nach der obigen Gleichung offenbar die Dimension einer Länge. Denn da π, ν^2 und μ numerische Koefficienten sind, so ergiebt sich für L das Verhältnis einer Fläche zu einer Länge, also eine Länge. Da wir überall das C.G.S.-System zu Grunde gelegt haben, so ist die Einheit des Selbstinduktionskoefficienten gleich dem Centimeter. Für den praktischen Gebrauch ist ein solches Maass zu klein: es ist hier eine Tausend Millionen mal grössere Einheit angenommen. Man bezeichnet sie entweder als *Sekohm,* weil sie als das Produkt einer Geschwindigkeit (Ohm) und einer Zeit (Sekunde) betrachtet werden kann, oder auch als *Quadrant,* weil 10^9 cm annähernd gleich der Länge des Erdquadranten ist, oder endlich als *Henry* zu Ehren des amerikanischen Elektrikers gleichen Namens. Der letzte Name scheint jetzt allgemein gebräuchlich zu werden, seitdem er von dem internationalen elektrischen Kongress zu Chicago empfohlen worden ist.

Wird L in Henry angegeben, so müssen wir den Faktor 10^{-9} weglassen und erhalten

$$E_s = 2\pi N L I, \quad \ldots\ldots\ldots \quad (40)$$

wo I den maximalen Werth der Stromstärke in Ampère und E_s die Selbstinduktion in Volt bezeichnet. Die effektive Selbstinduktion ist offenbar gleich $E_s/\sqrt{2}$, und da sich auch die effektive Stromstärke zu der maximalen wie $1:\sqrt{2}$ verhält, so erhalten wir für die Beziehung zwischen effektiver Stromstärke und effektiver Selbstinduktion den Ausdruck

$$e_s = 2\pi N L i. \quad \ldots\ldots\ldots \quad (41)$$

Um einen Gleichstrom von der Stärke i durch den Widerstand w zu treiben, ist eine elektromotorische Kraft

$$e = w\,i$$

nöthig. Eine ähnliche Beziehung gilt für die elektromotorische Kraft des Wechselstroms, der mit einer Stärke i durch eine Spule mit Selbstinduktion fliessen soll. Nur tritt hier der Ausdruck $2\pi N L$ an die Stelle des Widerstandes w. Dieser hat dieselbe Dimension wie ein Widerstand; denn da L eine Länge und N das Reciproke einer Zeit darstellt, so hat NL die Dimension einer Geschwindigkeit. Da aber der Widerstand NL keine Energie wie der Ohm'sche Leitungswiderstand w verzehrt, bezeichnen wir ihn zur Unterscheidung als *induktiven Widerstand* oder *Induktanz.*

Wir wollen jetzt untersuchen, wie man die Beziehung zwischen Stromstärke und Selbstinduktion graphisch darstellen kann. Offenbar muss der Radius Vektor der Stromstärke auf dem der elektromotorischen Kraft der Spule senkrecht stehen; denn nur so ist es möglich, dass die Projektion des einen verschwindet, während die Projektion des andern ein Maximum ist. Um die Richtung des Stromes und der elektromotorischen Kraft zu fixiren, nehmen wir an, dass der Strom eine positive Richtung besitzt, wenn er durch die Spule B (Fig. 76) von links nach rechts fliesst; in dem Diagramm soll dies dadurch zum Ausdruck kommen, dass die Projektion des Radius Vektor der Stromstärke oberhalb des Mittelpunktes liegt. Dreht sich alsdann der Radius Vektor in demselben Sinne wie der Uhrzeiger und zählen wir die Drehungswinkel von der linken Seite der Abscissenachse aus, so sind alle Werthe der Stromstärke zwischen $\alpha = 0$ und $\alpha = \pi$ positiv und zwischen $\alpha = \pi$ und $\alpha = 2\pi$ negativ.

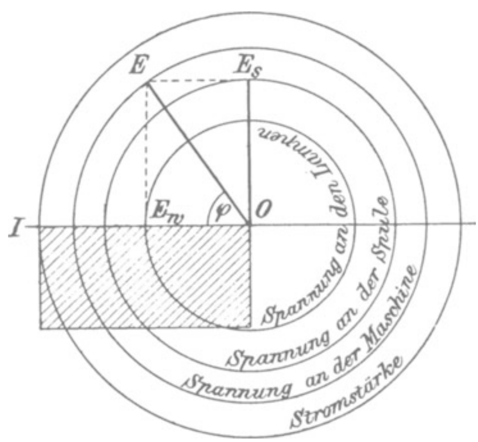


Fig. 77.

In ähnlicher Weise bezeichnen wir die in der Spule hervorgerufene elektromotorische Kraft als positiv, wenn sie einen positiven Strom erzeugt, also einen solchen, der von links nach rechts fliesst. Nun muss offenbar die Selbstinduktion nach dem Lenz'schen Gesetz die Amplitude der Stromwelle verkleinern. In dem Moment also, wo die Stromstärke durch Null hindurchgeht, wirkt die Selbstinduktion der Spule B von rechts nach links, d. h. sie ist negativ. Die Maschine A muss daher in diesem Zeitpunkte auf die Spule eine gleiche und entgegengesetzt gerichtete elektromotorische Kraft ausüben, die in dem Diagramm (Fig. 77) als die vertikale Linie $O\,E_s$ eingetragen ist. Der entsprechende Radius Vektor der Stromstärke ist $O\,I$. Der Spannungsmesser v_1, der an den Klemmen der Spule B

anliegt, zeigt also die effektive Spannung an, welche die Maschine auf die Spule B ausüben muss, um der Selbstinduktion das Gleichgewicht zu halten. Ausserdem muss die Maschine aber noch den Strom für die Lampen erzeugen. Da diese nur einen Leitungswiderstand darstellen, so hat die Spannung und der Strom der Lampen gleiche Phase, und für ihre gegenseitige Abhängigkeit gilt das Ohm'sche Gesetz. Ist die Spannung E_w aufzuwenden, um einen Strom von der Stärke I durch den Widerstand w zu schicken, so haben wir

$$E_w = w\,I$$

und

$$e_w = w\,i;$$

diese Spannung liest man am Spannungsmesser v_2 ab. In dem Diagramm ist die maximale Spannung der Lampen durch die horizontale Linie $O\,E_w$ dargestellt. Neben der Spannung $O\,E_w$ hatte die Maschine aber noch die Spannung $O\,E_s$ zu liefern: setzen wir beide mittels des Kräfteparallelogramms zusammen, so erhalten wir $O\,E$ als die maximale Gesammtspannung, welche die Maschine auf den Stromkreis ausüben muss. Der Radius Vektor der Spannung OE passirt nun die vertikale Lage vor dem Radius Vektor der Stromstärke, da beide sich im Sinne des Uhrzeigers drehen, d. h. das Maximum der Stromstärke fällt nicht mit dem Maximum der Spannung zusammen; ihre Phasen sind gegeneinander um den Winkel φ verschoben, der deshalb der *Winkel der Phasenverschiebung* oder schlechthin *Phasenverschiebung* genannt wird.

Nach unserer Annahme verzehrt die Spule B keine Energie, diese wird vielmehr ausschliesslich in den Lampen verbraucht; die Leistung ist daher

$$a = i\,e_w = \frac{I\,E_w}{2}.$$

In dem Diagramm wird die Leistung demnach durch die halbe Fläche des schraffirten Rechtecks dargestellt. Hätten wir statt der maximalen Werthe die effektiven aufgetragen, so würde die Leistung durch die ganze Fläche des Rechtecks ausgedrückt. Da

$$O\,E_w = O\,E \cos\varphi,$$

so haben wir auch

$$a = \frac{I\,E \cos \varphi}{2}$$

oder, wenn die effektiven Werthe eingesetzt werden,

$$a = i\,e \cos \varphi \quad \ldots\ldots\ldots \quad (42)$$

Um also die Anzahl der Watt zu finden, die die Wechselstrommaschine abgiebt, müssen wir den effektiven Werth der Stromstärke (in Ampère) mit dem effektiven Werth der Spannung (in Volt) und dem Kosinus der Phasenverschiebung multipliciren. Es ist interessant zu sehen, für welchen Lampenwiderstand diese Leistung ein Maximum wird. Aus Gleichung (41) folgt, dass

$$i = \frac{e_s}{2\pi N L};$$

setzt man diesen Werth in Gleichung (42) ein, so erhält man

$$a = \frac{e_s\, e \cos \varphi}{2\pi N L}.$$

Da sich die Selbstinduktion der Spule nicht ändert, so ist $2\pi N L$ eine Konstante, und die Leistung ist dem Produkt $e_s\, e \cos \varphi = e_s\, e_w$ proportional. Dies ist ein Maximum, sobald $e_s = e_w$, d. h. wenn der Radius Vektor OE mit der horizontalen Achse einen Winkel von 45^0 einschliesst, also wenn $w = 2\pi N L$ ist und die Phasenverschiebung 45^0 beträgt.

Aus dem Diagramm ergiebt sich, dass

$$e^2 = e_w^2 + e_s^2;$$

da nun $e_w = i\,w$ und $i_s = 2\pi i N L$, so haben wir auch

$$e^2 = i^2\,[w^2 + (2\pi N L)^2]$$

und

$$i = \frac{e}{\sqrt{w^2 + (2\pi N L)^2}} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (43)$$

Mittels dieser Formel kann man die Stromstärke bestimmen, wenn die Periodenzahl, die elektromotorische Kraft, der Widerstand und die Selbstinduktion des Stromkreises gegeben sind. Die Analogie mit dem Ohm'schen Gesetz tritt sofort hervor: nur wird der Nenner auf der rechten Seite im vorliegenden Falle durch die Quadratwurzel aus der Summe zweier Ausdrücke dargestellt, von denen der eine das Quadrat des Ohm'schen Widerstandes und der andere das Quadrat des induktiven Widerstandes bedeutet. Man bezeichnet diesen Nenner als *virtuellen Widerstand* oder *Impedanz*; nach Fleming's Vorgang kann man ihn als die Hypotenuse eines rechtwinkligen Dreiecks betrachten, von dessen Katheten die eine den Ohm'schen und die andere den induktiven Widerstand darstellt (Fig. 78).

In dem oben behandelten Falle liess sich die Leistung der Wechselstrommaschine leicht berechnen; wir brauchten zu diesem Zweck nur die Stärke des Stromes zu bestimmen, der durch die Lampen fliesst. Diese Berechnung galt jedoch nur unter der Voraussetzung, dass die Spule B keine Energie absorbirt. In Wirklichkeit geschieht dies aber stets; denn die Spule besitzt immer einen bestimmten Widerstand, in welchem elektrische Energie in Wärme

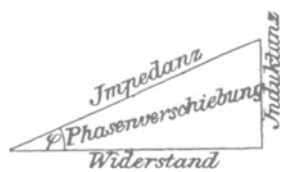


Fig. 78.

umgesetzt wird. Wir wollen jedoch noch weiter annehmen, dass die Spule auch noch in der einen oder andern Weise Nutzarbeit leistet. Sie möge z. B. als primäre Spule eines Transformators oder als Ankerwicklung eines Wechselstrommotors dienen. Alsdann ist klar, dass die an die Spule gelieferte Energie immer gleich dem Produkt der Stromstärke in diejenige Komponente der elektromotorischen Kraft ist, die mit der Stromstärke die gleiche Phase besitzt. Für diese beiden Faktoren gilt aber das Ohm'sche Gesetz; wir können daher jede Art von Nutzarbeit durch die Energie ersetzt denken, die in einem passend gewählten induktionsfreien Widerstande als Wärme verzehrt wird, und wollen deshalb statt des Transformators oder Motors eine Spule B annehmen, die denselben Selbstinduktionskoefficienten besitzt und deren Widerstand die gleiche Energiemenge verzehrt, wie an den Transformator oder Motor abgegeben wird.

Bezeichnen wir diesen Widerstand mit w_1 und den Widerstand der Lampen mit w_2, so wird in der Spule die Leistung $i^2 w_1$ und in den Lampen die Leistung $i^2 w_2$ verbraucht; die Maschine muss also den Betrag $i^2(w_1 + w_2)$ liefern. Nun sei die effektive Spannung an den Klemmen der Spule B gleich e_1, an den Lampen gleich e_2 und an der Maschine gleich e. Die elektromotorische Kraft e_1 können wir uns aus zwei Komponenten entstanden denken, von denen die eine e' gleiche Phase mit der Stromstärke hat und deshalb gleich iw_1 ist, während die andere e_s von der Selbstinduktion herrührt und der Stromstärke um 90^0 voraneilt. In Fig. 79 möge e_1 durch die Strecke OB dargestellt sein; alsdann ist die Selbstinduktion e_s gleich OC und die Komponente e' gleich OA. In ähnlicher Weise stellt OG die Klemmenspannung der Maschine dar, bei der die Komponente OD in gleicher Phase mit der Stromstärke ist. Da die Lampen keine Selbstinduktion besitzen, so liegt der Punkt G nicht höher über OD als der Punkt B, und die Spannung der Lampen

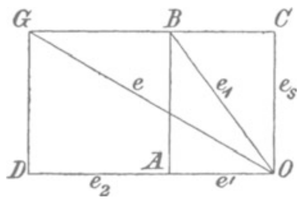


Fig. 79.

ist mit der Stromstärke und mit e' in gleicher Phase. Wir haben deshalb folgende Beziehungen:

$$e' + e_2 = OD,$$

$$e_s^2 = e_1^2 - e'^2,$$

$$e_s^2 = e^2 - (e' + e_2)^2$$

und

$$e' = \frac{e^2 - e_1^2 - e_2^2}{2\, e_2}.$$

Für die in Spule B verzehrte Leistung a_1, die gleich $e'i$ ist, finden wir also

$$a_1 = \frac{i\,(e^2 - e_1^2 - e_2^2)}{2\, e_2} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad (44)$$

Um a_1 bestimmen zu können, müssen wir daher drei Spannungen messen. Ausserdem ist noch eine Stromstärke zu bestimmen;

es genügt jedoch auch, wenn uns der Widerstand w_2 der Lampen oder der Widerstand von einem andern induktionsfreien Theile des Stromkreises bekannt ist. Denn da

$$i = \frac{e_2}{w_2},$$

so ist auch

$$a_1 = \frac{e^2 - e_1^2 - e_2^2}{2\,w_2} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (45)$$

Gleichung (44) ist indessen für den praktischen Gebrauch bequemer, da sich der Widerstand von Glühlampen nur schwer mit hinreichender Genauigkeit messen lässt.

Nach dieser *Methode der drei Spannungsmesser* haben zuerst Ayrton und Sumpner die Leistung eines Wechselstroms bestimmt. Der Genauigkeit halber führt man am besten alle Spannungsmessungen mit demselben Instrument aus, was sich leicht mit passenden Verbindungen und Umschaltungen erreichen lässt. Ferner wählt man den induktionsfreien Widerstand am zweckmässigsten so, dass e_2 annähernd gleich e_1 wird. Weichen diese beiden Grössen nämlich stark von einander ab, so verursacht ein kleiner Fehler bei der Spannungsmessung einen grossen Unterschied in der zu bestimmenden Leistung.

Die Leistung der Maschine ist offenbar gleich der Summe der Energiemengen, die an die Spule und an die Lampen abgegeben werden. Wir haben deshalb

$$a = a_1 + i\,e_2,$$

$$a = \frac{i\,(e^2 + e_2^2 - e_1^2)}{2\,e_2}, \quad \ldots\ldots\ldots \quad (46)$$

$$a = \frac{e^2 + e_2^2 - e_1^2}{2\,w_2} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (47)$$

Soll e_1 nicht stark von e_2 abweichen, so muss e um ungefähr 40 % grösser als e_1 oder e_2 sein. In dem Falle, wo es darauf ankommt, die gesammte Leistung der Maschine zu messen, kann man immer eine solche Anordnung treffen, dass dieser Bedingung Genüge geleistet wird. Wir brauchen den Transformator oder Motor B zu diesem Zweck nur mit einer Spannung arbeiten zu lassen, die kleiner ist als die Klemmenspannung der Maschine. Wird uns aber die Aufgabe gestellt, die Leistung zu messen, die an den Transformator oder Motor B abgegeben wird, so müssen wir sie bei der Spannung untersuchen, für die sie konstruirt sind, und die Wechselstrommaschine muss alsdann mit einer höhern Spannung arbeiten. Lässt sich dies nicht ausführen, so müssen wir nach dem Vorgang von Fleming die *Methode der drei Strommesser* anwenden. Sie ergiebt sich aus Fig. 80, wo A die Wechselstrommaschine und a, a_1 und a_2 Strommesser bedeuten, die die gesammte Stromstärke und ihre beiden Komponenten in den Zweigen der Spule B und in den Lampen G anzeigen. Eine ähnliche Untersuchung wie die oben angestellte ergiebt für die an die Spule abgegebene Leistung die Beziehung

$$a_1 = \frac{e\,(i^2 - i_1{}^2 - i_2{}^2)}{2\,i_2}, \quad \ldots \ldots \quad (48)$$

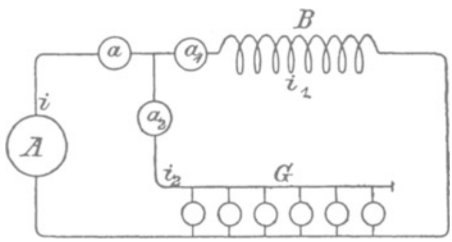


Fig. 80.

wo e die Klemmenspannung der Spule bedeutet. Ist der Widerstand w_2 von G genau bekannt, so braucht man keine Spannung mehr zu messen, da alsdann

$$a_1 = \frac{w_2\,(i^2 - i_1{}^2 - i_2{}^2)}{2}. \quad \ldots \ldots \quad (49)$$

Die Methoden, die wir hier für die Messung der Leistung eines Wechselstroms angegeben haben, besitzen beide den Nachtheil, dass eine verhältnismässig ebenso grosse Energiemenge als die zu messende in einem induktionsfreien Widerstande vernichtet werden muss. Für kleine Energiemengen wendet man zu diesem Zweck am passendsten einen Satz Glühlampen an. Handelt es sich jedoch darum, eine Leistung von höherm Betrage zu bestimmen, die 100 Kilowatt und mehr beträgt, so würde ein dazu passender Widerstand aus Glühlampen wenig handlich und sehr theuer sein. In diesem Falle kann man Widerstände aus Metallbändern benutzen, die derartig auf Holzrahmen angeordnet sind, dass sie keine Induktionswirkungen ausüben. Die Bänder müssen hinreichend dimensionirt sein, damit man einen starken Strom hindurchschicken kann, ohne sie zu sehr zu erwärmen; ferner ist es zweckmässig, eine Legirung mit geringem Temperaturkoefficienten zu wählen.

Handelt es sich darum, die Leistung einer Dynamomaschine, also die von der Maschine abgegebene Energiemenge zu bestimmen, so führt schon eine einfachere Methode zum Ziel. Man schliesst die Maschine einfach durch einen induktionslosen Widerstand und misst diesen und die Stärke des ihn durchfliessenden Stromes. Die Leistung ergiebt sich dann, wenn man das Quadrat der Stromstärke mit dem Widerstande multiplicirt. Diese Methode eignet sich besonders für die Werkstatt, wenn man eine Maschine nach der Herstellung untersuchen will. Sie mag auch häufig dort von Nutzen sein, wo die Maschine schon installirt ist. Doch hat diese Messungsart alsdann grosse Unbequemlichkeiten im Gefolge, da sie grosse, genau gemessene Widerstände erfordert. Ganz unbrauchbar ist sie aber überall da, wo die zu messende elektrische Energie der Maschine zugeführt wird, diese also als Motor dient.

In solchen Fällen kann man sich noch einer andern Methode bedienen, wozu man einen *Leistungsmesser* (*Wattmeter*) braucht. Dies Instrument ist ebenso konstruirt wie ein gewöhnliches Gleichstromdynamometer, bei dem der zu messende Strom beide Spulen hintereinander durchläuft; in unserm Falle durchfliesst jedoch der Strom, dessen Leistung gemessen werden soll, nur die eine der beiden Spulen, während die andere im Nebenschluss zu dem zu untersuchenden Apparat liegt. Nöthigenfalls schaltet man noch einen Widerstand in den Stromkreis dieser Spule.

Durchfliesst ein Wechselstrom ein Dynamometer, so ändert sich die Stromrichtung immer gleichzeitig in beiden Spulen; in Folge dessen hat die Kraft, mit der die bewegliche Spule abgelenkt wird, stets dieselbe Richtung. Die Intensität der Kraft, die in jedem Augenblick dem Quadrat der Stromstärke proportional ist, wechselt jedoch $2N$ mal in einer Sekunde zwischen Null und dem Maximum. Besässe die Spule keine Masse, so würde sie unter dem Einfluss des Stromes in Schwingungen gerathen. Da jedoch die Masse der Spule im Verhältnis zu der darauf wirkenden Kraft sehr gross ist und diese sehr schnell oscillirt, so erfährt die bewegliche Spule eine konstante Ablenkung, wie es auch unter dem Einfluss eines Gleichstroms geschieht.

Bedeutet K den Reduktionsfaktor des Instruments, den eine Aichung mittels Gleichstroms ergiebt, und ruft ein solcher von der Stärke j eine Zeigerablenkung D hervor, so ist

$$j = K\sqrt{D};$$

für den Wechselstrom erhalten wir

$$D K^2 = \frac{1}{T}\int_0^T I^2 \sin^2 \alpha \, dt.$$

Nun ist aber

$$\frac{1}{T}\int_0^T I^2 \sin^2 \alpha \, dt = \frac{1}{2} I^2 = i^2,$$

also

$$i = K\sqrt{D}.$$

Benutzen wir also ein Dynamometer, das mit Gleichstrom geaicht ist, zur Messung eines Wechselstroms, so giebt es dessen effektive Stärke an.

Für die Strommessung sind die beiden Spulen des Instruments gewöhnlich im Innern mit einander verbunden, so dass von den äussern Klemmen die eine zu der festen und die andere zu der beweglichen Spule führt. Im Allgemeinen sind allerdings zur Erzielung eines grössern Messbereichs zwei feste Spulen und drei äussere Klemmen vorgesehen. Doch wollen wir hier der Einfachheit wegen annehmen, es wäre nur eine feste Spule vorhanden; ferner soll die bewegliche Spule nur aus einer einzigen Windung bestehen. In Fig. 81 bedeute S die bewegliche und s die feste Spule, df die Verbindung zwischen beiden und $K_1 K_2$ die äussern Klemmen. Gewöhnlich wird das Instrument also in der Weise benutzt, dass der Strom bei K_1 eintritt, beide Spulen im Sinne des Uhrzeigers durchläuft und bei K_2 austritt; auf die bewegliche Spule S wirkt dann eine ablenkende Kraft, der durch die Torsion der Feder das Gleichgewicht gehalten wird. Eine Ablenkung nach der andern Seite ist meistens durch einen Anschlag verhindert. Tritt der Strom bei K_2 ein und bei K_1 aus, so wird die Richtung des Stromes zwar in beiden Spulen umgekehrt: die Ablenkung erfolgt jedoch in demselben Sinne wie vorher.

Wir wollen jetzt die Verwendung des Instruments zur Messung von Leistungen ins Auge fassen. Zu diesem Zwecke ist die Verbindung df an eine dritte Klemme K_3 geführt und das Instrument in der Weise in den Stromkreis geschaltet, wie es Fig. 81 angiebt. A bedeutet hier die Wechselstrommaschine, B den Apparat, der die zu messende Leistung empfängt, W einen induktionsfreien Widerstand, der aus einer Anzahl Glühlampen bestehen mag, und a einen Strommesser. Die feste Spule s und der Widerstand W bilden also einen Nebenschluss zu B, und die Richtung der in S und s fliessenden Ströme ist natürlich so zu wählen, dass sie eine Ablenkung der beweglichen Spule im richtigen Sinne hervorrufen. Schliessen wir den Widerstand der festen Spule und des Strommessers in W ein und vernachlässigen wir den Widerstand der beweglichen Spule,

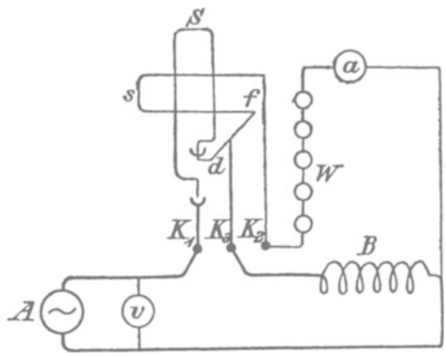


Fig. 81.

sowie die Selbstinduktion des ganzen Dynamometers, so ist der Strom i, der in der Spule s fliesst, in gleicher Phase mit der Klemmenspannung e des Apparats B; es gilt daher für diesen Zweig das Ohm'sche Gesetz.

Das Feld des Stromes i übt auf die bewegliche Spule, in der ein Strom von der Stärke I fliessen soll, eine ablenkende Kraft aus, deren momentaner Werth proportional

$$I_0 \, i_0 \sin(\alpha - \varphi) \sin \alpha$$

ist, wo φ die Phasenverschiebung und I_0, i_0 die maximalen Werthe der beiden Stromstärken bedeuten. Da nun

$$i_0 = \frac{e_0}{W},$$

so haben wir für die Kraft, die die Ablenkung D hervorbringt,

$$D K^2 = \frac{1}{T} \int_0^T I_0 \sin(\alpha - \varphi) \frac{1}{W} e_0 \sin \alpha \, dt$$

oder

$$D K^2 = \frac{1}{W} \frac{1}{T} \int_0^T I_0 e_0 \sin(\alpha - \varphi) \sin \alpha \, dt.$$

Stellen wir die Beziehungen zwischen diesen Grössen graphisch dar, so haben wir eine elektromotorische Kraft e_0 einzuführen, die dem Strome I_0 um den Winkel φ voraneilt; die Leistung ist also

$$A = \frac{I_0 e_0}{2} \cos \varphi = \frac{1}{T} \int_0^T I_0 e_0 \sin(\alpha - \varphi) \sin \alpha \, dt.$$

Statt des Integrals bekommen wir deshalb

$$D K^2 = \frac{1}{W} \frac{I_0 e_0}{2} \cos \varphi,$$

und da $I_0 = I \sqrt{2}$ und $e_0 = e \sqrt{2}$, so gilt

$$D K^2 = \frac{I e}{W} \cos \varphi \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (50)$$

Nun ist die Leistung, die wir mit Hülfe des Leistungsmessers bestimmen wollen,

$$A = I e \cos \varphi,$$

folglich ergiebt sie sich aus den Angaben des Leistungsmessers als

$$A = W D K^2 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (51)$$

K bezeichnet hier, wie oben, den Reduktionsfaktor des Instruments, wie ihn eine Aichung mittels Gleichstroms ergiebt. Um Gleichung (51) benutzen zu können, muss der Widerstand W genau bekannt sein. Ist dies nicht der Fall, so haben wir mittels des Spannungsmessers v die Spannung e und mittels des Strommessers a die Stromstärke i zu beobachten und hieraus W zu berechnen. Die Formel lautet dann

$$A = \frac{e}{i} D K^2 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (52)$$

Ist es unbequem, für jede Beobachtung die drei Ablesungen (D, e und i) anzustellen und ist ein besonderer Strommesser nicht vorhanden, so benutzen wir an Stelle desselben die beiden Spulen des Leistungsmessers in Hintereinanderschaltung und machen zuerst eine Reihe zusammengehöriger Ablesungen von e, i und W. Darnach lässt sich W als Funktion von e in einer Kurve auftragen; man braucht dann nur noch D und e zu bestimmen, da sich die Werthe für W aus der Kurve entnehmen lassen.

Ist der Leistungsmesser so geschaltet, wie es Fig. 81 dargestellt, so misst man damit die gesammte Leistung der Wechselstrommaschine; hierin ist derjenige Betrag eingeschlossen, der in dem Widerstande W vernichtet wird. Man muss also die Leistung $\frac{e^2}{W}$

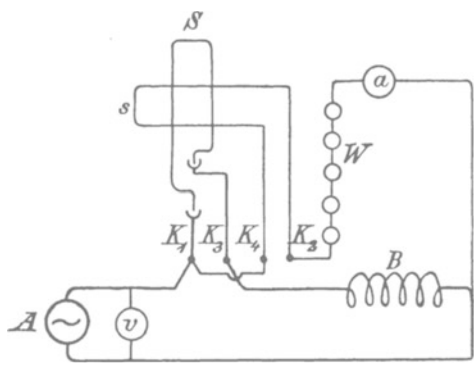


Fig. 82.

von dem Gesammtresultat abziehen, wenn man den Theil der Leistung erhalten will, der an B abgegeben wird. Er lässt sich jedoch auch direkt messen, wenn man die Verbindungen der Klemmen K_1 und K_3 vertauscht. Der Strom für die feste Spule wird alsdann vor Eintritt in die bewegliche abgenommen, so dass in dieser derselbe Strom fliesst wie in B. Diese Schaltung hat jedoch den Nachtheil, dass der Strom die beiden Spulen nicht in demselben Sinne durchfliesst; die bewegliche Spule wird also nach der Seite des Anschlags hin abgelenkt. Man entfernt deshalb die innere Verbindung df und bringt an dem Instrument vier Klemmen an (Fig. 82). Verbindet man alsdann K_1 und K_4, so fliesst der Strom der festen Spule s nicht durch die bewegliche S, und die in W vernichtete Energie geht nicht in die Messung ein. Für diese ist es offenbar gleichgültig, ob W zwischen K_1 und K_4 geschaltet wird oder zwischen K_2 und a, wie es in der Figur angegeben ist. Doch ist zu bedenken, dass das Instrument im ersten Falle den ganzen Spannungsunterschied zwischen K_1 und K_3 aushalten muss, was bei hohen Spannungen leicht zu Kurzschlüssen führt.

Der Leistungsmesser kann ferner dazu benutzt werden, den Phasenunterschied zweier Ströme zu messen, welche dieselbe Periodenzahl besitzen; auch lässt sich mit der in Fig. 81 dargestellten Schaltung die Phasenverschiebung zwischen Stromstärke und elektromotorischer Kraft bestimmen. Es mögen I und i die Stärke der beiden Ströme bezeichnen, deren Phasendifferenz gemessen werden soll; dann ist, wenn wir den einen durch die feste und den andern durch die bewegliche Spule des Leistungsmessers schicken, nach Gleichung (50)

$$D K^2 = I i \cos \varphi. \quad \ldots \ldots \quad (53)$$

Schalten wir nun die beiden Spulen hintereinander und schicken einmal den einen und dann den andern Strom hindurch, so mögen die Ablenkungen D_1 und D_2 beobachtet werden, so dass

$$I = K \sqrt{D_1},$$

$$i = K \sqrt{D_2};$$

folglich

$$D K^2 = K^2 \sqrt{D_1 D_2} \cos \varphi,$$

oder

$$\cos \varphi = \frac{D}{\sqrt{D_1 D_2}}. \quad \ldots \ldots \quad (54)$$

Man braucht also bei dieser Methode, die von T. H. Blakesley herrührt, nicht einmal den Reduktionsfaktor des Instruments zu kennen.

Wir haben bisher vorausgesetzt, dass die Selbstinduktion des Leistungsmessers zu vernachlässigen ist, d. h. dass der Strom der festen Spule mit der elektromotorischen Kraft gleiche Phase hat. Nun kann man freilich den Einfluss der Selbstinduktion dadurch verringern, dass man den Widerstand W sehr gross wählt; doch leidet auf diese Weise die Empfindlichkeit der Messung. Wir wollen deshalb untersuchen, welche Aenderungen die Selbstinduktion hervorbringt.

Zuerst erfährt der Strom i in Folge der Selbstinduktion der festen Spule eine Phasenverschiebung ψ gegen die Spannung e. Ist φ, wie vorher, die Phasenverschiebung von I gegen e, l der Selbstinduktionskoefficient der festen Spule und L der des Hauptkreises, in den die bewegliche Spule geschaltet ist, so haben wir

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{2 \pi N l}{W}$$

und

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{2 \pi N L}{w},$$

wo w einen Widerstand bezeichnet, in dem eine gleiche Energiemenge, wie sie in B verbraucht wird, in Wärme umgesetzt werden kann.

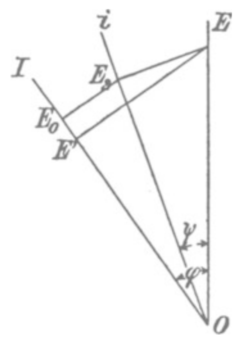


Fig. 83.

Es möge in Fig. 83 OE die effektive elektromotorische Kraft, welche in den Stromkreis geliefert wird, und OI die effektive Stromstärke bezeichnen. Projiciren wir alsdann den Punkt E auf OI nach E_1, so ist OE_1 die Komponente der Spannung, die mit dem Strome gleiche Phase hat. Die wahre Leistung ist daher gleich $OI \times OE_1$, während das Instrument die scheinbare Leistung $OI \times OE_0$ angiebt. Der Punkt E_0 ist die Projektion von E_2 auf OI und E_2 die Projektion von E auf den Radius Vektor i, der mit E den Winkel ψ einschliesst. Wollen wir also die wahre Leistung erhalten, so müssen wir die Ablesung mit dem Verhältnis

$$\frac{OE_1}{OE_0} = \frac{OE \cos \varphi}{OE \cos \psi \cos (\varphi - \psi)}$$

multipliciren. Bezeichnen wir also mit a die wahre und mit a_1 die scheinbare Leistung, so erhalten wir

$$a = a_1 \frac{\cos \varphi}{\cos \psi \cos (\varphi - \psi)}. \quad \ldots \ldots \quad (55)$$

Die Grösse ψ ist für dasselbe Instrument eine Konstante, die man nur einmal zu bestimmen braucht, indem man die Selbstinduktion der Spule bestimmt oder indem man eine Energiemessung an einem induktionsfreien Widerstande ausführt, den man an die Stelle der Spule B setzt. Da sich die Phasenverschiebung von I gegen i aus Gleichung (54) ergiebt (man erhält in diesem Falle nicht φ, sondern $\varphi - \psi$), so sind alle Daten für die Berechnung der Korrektion bekannt.

Gleichung (55) lässt sich auch in folgender Form schreiben:

$$a = a_1 \frac{1 + \operatorname{tg}^2 \psi}{1 + \operatorname{tg} \psi \operatorname{tg} \varphi}.$$

Man erkennt daraus, dass es zwei besondere Fälle giebt, wo die Korrektion verschwindet. Der erste tritt ein, wenn der Leistungsmesser so empfindlich ist, dass man den Widerstand W sehr gross wählen kann. Dann ist der Einfluss der Selbstinduktion sehr gering und ψ liegt so nahe an Null, dass die Korrektion zu vernachlässigen ist. Dies ist aber auch dann der Fall, wenn die Selbstinduktion der festen Spule und die des zu prüfenden Apparates einander gleich sind, wenn demnach $\operatorname{tg}^2 \psi = \operatorname{tg} \psi \operatorname{tg} \varphi$ wird. Ist $\psi < \varphi$, so liefert der Leistungsmesser für die zu messende Leistung zu grosse Werthe, dagegen zu kleine, wenn $\psi > \varphi$ ist. Im letzten Falle, der jedoch für die Praxis ohne Bedeutung ist, kann die Korrektion unbegrenzt bis ins Unendliche für $\psi = \frac{\pi}{2}$ wachsen. Die Selbstinduktion der neuern Leistungsmesser hat nur einen geringen Betrag, sodass der Winkel ψ im Allgemeinen kleiner als φ bleibt.

Wir haben gezeigt, dass die Korrektion für $\psi = 0$ und $\psi = \varphi$ verschwindet; zwischen diesen Grenzen giebt es einen Werth von ψ, für den die Korrektion ein Maximum wird. Dies tritt dann ein, wenn der Punkt E_0 (Fig. 83) am weitesten von O entfernt liegt, d. h. wenn die Linie $E_0 E_2$ eine Tangente an den Halbkreis über OE bildet. In diesem Falle ist $\psi = {}^1/_2\, \varphi$, und der Korrektionsfaktor ist nach Gleichung (55) gleich $\cos \varphi : \cos^2 \frac{\varphi}{2}$. Die folgende Tabelle enthält für verschiedene Phasenverschiebungen die maximalen Werthe der Korrektion und den höchsten Fehler, den man begehen kann, wenn die Korrektion ganz vernachlässigt wird:

Phasen-verschiebung ψ	Scheinbare Leistung in Watt	Wahre Leistung in Watt	Fehler in %
5°	1000	998,5	0,15
10	1000	994,6	0,54
15	1000	982,7	1,73
20	1000	968,8	3,12
25	1000	950,8	4,92
30	1000	928,2	7,18

Achtes Kapitel.

Selbstinduktion des Ankers. — Rückwirkung des Ankers auf das Feld. — Günstigste Periodenzahl. — Kraftübertragung zwischen zwei Wechselstrommaschinen. — Einfluss der Kapacität.

Im Folgenden wollen wir die Beziehung zwischen der Klemmenspannung und der elektromotorischen Kraft im Anker einer Wechselstrommaschine untersuchen. Wir haben schon oben gezeigt, wie die in den Ankerspulen erzeugte elektromotorische Kraft berechnet werden kann, die natürlich bei offenem Stromkreise der Klemmenspannung gleich ist. Ferner können wir offenbar die elektromotorische Kraft variiren, indem wir den erregenden Strom abändern; die Beziehung zwischen diesen beiden Grössen lässt sich (ähnlich wie bei Gleichstrommaschinen) durch eine Kurve darstellen, die als statische Charakteristik der Wechselstrommaschine bezeichnet werden kann. Schliessen wir nun aber den äussern Stromkreis, so wird die Klemmenspannung kleiner, und zwar 1. in Folge des Ankerwiderstandes, 2. wegen der Selbstinduktion und 3. wegen der Rückwirkung des Ankers. Auf den Spannungsverlust, der durch den Widerstand des Ankers bewirkt wird, brauchen wir nicht weiter einzugehen; er lässt sich leicht nach dem Ohm'schen Gesetz berechnen, da hier die elektromotorische Kraft in gleicher Phase mit dem Strome ist. Dagegen ergiebt sich die Selbstinduktion nicht so einfach. Sie ist gegen die Stromstärke um ein Viertel der Periode verzögert. Damit ein Strom zu Stande kommt, muss die Selbstinduktion durch eine gleiche, aber entgegengesetzt gerichtete elektromotorische Kraft aufgehoben werden. Diese ist offenbar eine Komponente der gesammten elektromotorischen Kraft, die im Anker erzeugt wird; sie eilt dem Strome um ein Viertel der Periode voraus und kann leicht vorher bestimmt werden, wenn der Selbstinduktionskoefficient des Ankers eine konstante gegebene Grösse ist.

Die Selbstinduktion des Ankers hängt natürlich von der gegenseitigen Lage der Ankerspulen und der Pole der Feldmagnete ab, und da diese fortwährend wechselt, so ändert sich der Selbstinduktionskoefficient ebenfalls. Auch die Erregung der Feldmagnete ist von Einfluss auf ihn, da sich die Feldstärke um so schwerer verändern wird, je höher sie ist. Hierdurch werden jedoch nur geringe Unterschiede in dem Werthe des Selbstinduktionskoefficienten hervorgerufen. Ayrton untersuchte sie an einer Mordey'schen Wechselstrommaschine und fand, dass die Selbstinduktion des Ankers bei nicht erregtem Felde zwischen 0,036 und 0,038 Henry schwankte und dass sie nach der Erregung des Feldes um 14 % zugenommen hatte.

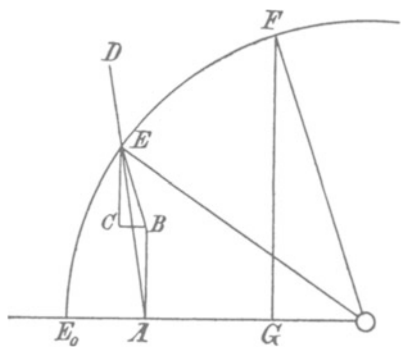


Fig. 84.

Wir können deshalb anehmen, dass die Selbstinduktion bei konstanter Erregung für alle Stellungen des Ankers denselben Werth hat; die elektromotorische Kraft, die zur Ueberwindung der Selbstinduktion erforderlich ist, lässt sich dann nach Formel (41) berechnen. Die elektromotorische Kraft, die in den Ankerspulen inducirt wird, kann als die Resultante dreier verschiedenen Komponenten betrachtet werden, deren erste die Klemmenspannung ist, die Nutzarbeit leistet und gleiche Phase mit dem Strome hat, wenn der äussere Stromkreis keine Selbstinduktion besitzt, sonst jedoch dem Strome vorauseilt. Sodann haben wir die elektromotorische Kraft, die den Ohm'schen Leitungswiderstand des Ankers zu überwinden hat und sich in gleicher Phase mit dem Strom befindet, und zuletzt noch diejenige elektromotorische Kraft, welche der Selbstinduktion das Gleichgewicht hält und dem Strome um ein Viertel der Periode vorauseilt. Die Beziehungen zwischen diesen verschiedenen Grössen sind in Fig. 84 graphisch dargestellt. OA liegt auf dem Radius Vektor der Stromstärke und bedeutet die Klemmenspannung, die im äussern Stromkreise Nutzarbeit leistet, AB ist die Selbstinduktion des äussern Stromkreises, BC der Spannungsverlust im Widerstande des Ankers und CE die Selbstinduktion des Ankers; dann ist OE die elektromotorische Kraft des Ankers. Da die Strecken AB, BC und CE der Stromstärke proportional sind, so liegt der Punkt E stets auf der Linie AD, wenn wir die Stromstärke verändern, gleichzeitig aber die Klemmenspannung OA konstant halten, wie dies gewöhnlich bei Beleuchtungs- und Kraftübertragungsanlagen der Fall ist. Bei einem grössern Stromverbrauch steigt hier E höher hinauf; es muss also die elektromotorische Kraft OE durch Verstärkung der Erregung vergrössert werden. Ist keine Vorrichtung vorhanden, mit der man die Erregung variiren kann, so ändert sich die Klemmenspannung. Ist diese bei voller Belastung gleich OA, und lassen wir, ohne die Erregung zu ändern, die Maschine immer weniger Arbeit leisten, bis dass sie schliesslich unbelastet ist, so bewegt sich der Punkt E auf dem Kreise nach E_0, und die Klemmenspannung geht von OA in OE_0 über.

Wenn die Klemmen der Maschine kurz geschlossen werden, so fällt die Selbstinduktion im äussern Stromkreise fort, und die elektromotorische Kraft des Ankers besteht aus zwei Komponenten, die von dem Widerstande und der Selbstinduktion des Ankers herrühren. Legen wir durch O eine Parallele OF zu BE, so stellt diese Linie OF die Ankerspannung im jetzigen Falle dar. Da die Dreiecke OGF und BCE ähnlich sind, so ist nun GF gleich der Stromstärke, wenn wir vorher bei voller Belastung die Strecke CE als Maass dafür betrachteten. Dies trifft jedoch nur annähernd zu. Denn in Wirklichkeit ist die Stromstärke bei Kurzschluss kleiner, weil das Feld durch die Rückwirkung des Ankers geschwächt wird, worauf wir unten zurückkommen. In Folge dessen ist eine übermässige Erhitzung des Ankers unmöglich gemacht und die Maschine bei Kurzschluss vor Beschädigung geschützt.

Bei einem Kurzschluss ist jedoch die Gefahr vorhanden, dass die Maschine durchgeht. Denn während die Dampfmaschine bei dem Kurzschluss einer Gleichstrommaschine stärker belastet wird, tritt bei einer Wechselstrommaschine das Gegentheil ein. Wir werden später zeigen, dass man Energie mit Hülfe von zwei Wechselstrommaschinen übertragen kann, von denen die eine als Generator, die andere als Motor dient. Beide laufen unter normalen Verhältnissen synchron; wächst aber die Belastung zu stark an, so kommt der Motor aus dem Tritt und bleibt stehen. Es verschwindet alsdann die elektromotorische Gegenkraft, die gleiche Phase mit dem Strom besitzt, und es sind nur noch der Widerstand der Leitung und des Generators, sowie dessen Selbstinduktion zu überwinden. In einem solchen Falle ist es im Interesse der Sicherheit der Anlage wünschenswerth, dass die Maschinen grosse Selbstinduktion besitzen. Hierdurch wird jedoch, wie wir gleich zeigen werden, die Leistung des Motors verringert und daher das Uebel noch schlimmer gemacht. Auch für den Generator hat eine grosse Selbstinduktion zwei Nachtheile im Gefolge; einmal wird dadurch die Leistung der Maschine herabgesetzt, da die Phasenverschiebung zwischen Spannung und Strom ansteigt, sodann muss die Erregung in weitern Grenzen geändert werden, wenn man für verschiedene Belastungen die Klemmenspannung konstant halten will. Der zweite Umstand ist besonders nachtheilig, wenn der Strom zu Beleuchtungszwecken benutzt wird, weil alsdann eine vermehrte Aufsicht in der Centrale nöthig ist.

Aus Allem geht hervor, dass die Anforderungen, die man an Wechselstromanlagen aus Gründen der Sicherheit und Bequemlichkeit stellen kann, bis zu einem gewissen Grade einander widersprechen. Es lassen sich deshalb hierfür keine festen Regeln aufstellen, die für alle Fälle Gültigkeit besitzen. Wir wollen jedoch bemerken, dass die Selbstinduktion der bessern Wechselstrommaschinen zwischen 20 und 40 % der Klemmenspannung schwankt.

Wir kommen nun zu dem dritten Faktor, der die elektromotorische Kraft einer Wechselstrommaschine herabsetzt, nämlich zu der Rückwirkung des Ankers auf die Feldmagnete. Besitzt der Strom keine Phasenverschiebung gegen die Ankerspannung, so übt der Ankerstrom keine Wirkung auf die Feldmagnete aus. Denn bei der symmetrischen Anordnung der Maschine wird die magnetisirende Wirkung des Stromes in einer Leitergruppe, die sich der Mitte des Polschuhs nähert, durch die entmagnetisirende Kraft ausgeglichen, welche dieselbe Gruppe bei ihrer Entfernung von dem Pol ausübt. Ist die Phase des Stroms jedoch verschoben, so ist die Symmetrie gestört, und die eine Wirkung überwiegt die andre, so dass das Feld entweder geschwächt oder verstärkt wird. Das

Resultat ist verschieden, je nachdem die Maschine als Generator oder als Motor verwandt wird, wie sich leicht aus den folgenden Figuren ergiebt.

In Fig. 85 sind N, S die Magnetpole eines Wechselstromgenerators, die in Wirklichkeit auf einem Kreise angeordnet sind, hier jedoch der Bequemlichkeit wegen in einer Geraden gezeichnet wurden. Das zu betrachtende Stück A des Ankers bewegt sich also in der Figur geradlinig, und zwar von links nach rechts, wie der Pfeil andeutet. Die schraffirten Rechtecke B, C und D sind Querschnitte durch den Wicklungsraum der verschiedenen Ankerspulen. Wie die Windungen jeder Gruppe und die verschiedenen Spulen unter einander verbunden sind, kommt für unsere Betrachtung nicht in Frage, wenn nur der Strom in allen Leitern derselben Gruppe in derselben Richtung und in den Windungen der benachbarten Gruppe im entgegengesetzten Sinne fliesst, wie es bei jeder Wicklungsmethode der

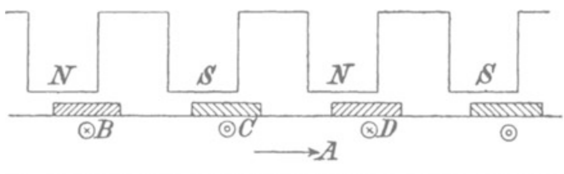


Fig. 85.

Fall sein muss. Die einzelnen vom Strome durchflossenen Leiter wirken alsdann zusammen gerade so, wie eine breite Stromschicht, die in den Wicklungsräumen B, C, D abwechselnd auf den Beobachter zu und von ihm wegfliesst; im ersten Falle ist die Stromrichtung in der Figur durch $\odot$ (Pfeil von vorn gesehen), im andern durch $\otimes$ (Pfeil von hinten gesehen) bezeichnet.

Ist die Phase des Stromes gegen die der elektromotorischen Kraft nach rückwärts verschoben, so erreicht die Stromstärke ihren maximalen Werth erst, nachdem der Mittelpunkt jeder Gruppe die Mitte des Polschuhes passirt und der Anker die in der Figur angegebene Stellung eingenommen hat. In dieser Lage üben alle Leiter, die schon den Polrand überschritten haben, einen entmagnetisirenden Einfluss auf das Feld aus. Diese Wirkung wird einerseits verstärkt, je mehr Leiter an dem Polrande vorbeikommen, anderseits aber geschwächt, da die Stromstärke fortwährend abnimmt. Ist diese gleich Null, bevor alle Leiter an dem Rande des folgenden Polschuhes vorbei sind, so wird auf diesen eine magnetisirende Wirkung ausgeübt, die sein Feld verstärkt. Doch ist diese Verstärkung des Feldes in Folge der durch die Phasenverschiebung hervorgerufenen Unsymmetrie geringer als die frühere Schwächung. Die Gesammtwirkung des Ankerstroms ruft also eine Schwächung des Feldes hervor. Eilt dagegen der Strom der elektromotorischen Kraft in der Phase voraus und zeichnen wir den Anker wieder in der Stellung (Fig. 86), wo die Stromstärke das Maximum erreicht, so überwiegt die magnetisirende Wirkung, und das Feld wird jetzt durch den Ankerstrom verstärkt.

Da der Strom im Anker eines Motors im umgekehrten Sinne fliesst, so sind auch seine Wirkungen entgegengesetzt, und es ergeben sich folgende Regeln: *Ist der Strom gegen die elektromotorische Kraft in der Phase verzögert, so schwächt er das Feld des Generators, verstärkt aber das Feld des Motors. Eilt der Strom der elektromotorischen Kraft in der Phase voraus, so verstärkt er das Feld des Generators, schwächt aber das Feld des Motors.*

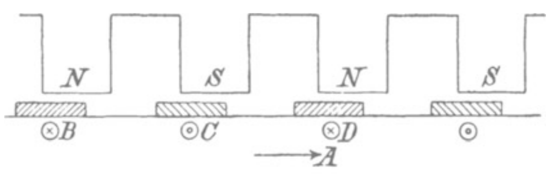


Fig. 86.

Die Erregung des Feldes wird durch den Ankerstrom um einen Betrag x (in Ampèrewindungen) geändert, der durch folgende Gleichung gegeben ist:

$$x = 0{,}0156\, \omega\, i\, \varphi \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (56)$$

Hier bezeichnet ω die Anzahl der Leiter in einer Gruppe, i die effektive Stromstärke in einem der Leiter und φ ihre Phasenverschiebung gegen die elektromotorische Kraft in Bogengraden.

Wir haben schon gesehen, dass die Selbstinduktion des Ankers die Klemmenspannung bei voller Belastung verkleinert; sie bewirkt ferner eine Phasenverzögerung, die ihrerseits wieder das Feld schwächt. In Folge dessen nehmen die Ankerspannung und die Klemmenspannung noch weiter ab. Diese verschiedenen Wirkungen addiren sich also, so dass die Klemmenspannung bei voller Belastung noch tiefer sinkt, als es dem Einfluss der Selbstinduktion allein entspricht, und dass bei einem Kurzschluss die Stromstärke noch geringer wird, als sie sich aus der graphischen Darstellung in Fig. 85 ergiebt. Da φ alsdann nahezu gleich 90^0 wird, so sind die entmagnetisirenden Ampèrewindungen des Ankers gleich $1{,}4\, \omega\, i$; das Feld erfährt also schon bei kleinen Werthen von i eine erhebliche Schwächung.

Bevor wir auf die Kraftübertragung mittels Wechselströmen eingehen, ist es zweckmässig zu untersuchen, welchen Einfluss die Rückwirkung und die Selbstinduktion des Ankers auf die Konstruktion und besonders auf die Periodenzahl der Wechselstrommaschine ausüben. In Bezug auf die letztere herrschen in der Praxis grosse Unterschiede, wenn wir die Kraftübertragungen für Beleuchtungs- und Kraftzwecke zusammenfassen. In den Vereinigten Staaten pflegt man gewöhnlich die Zahl von 133 Perioden in der Sekunde zu wählen, obwohl bei neuern Konstruktionen auch kleinere Werthe vorkommen. Die Fabrikanten Englands nehmen 100 bis 75 Perioden, während in Deutschland eine Zahl zwischen 65 und 44 gebräuchlich ist. Bei der ersten Kraftübertragungsanlage, die an den Niagarafällen errichtet wurde, ist die Periodenzahl zu 25 angenommen, und von dem hinzugezogenen Sachverständigen war sogar eine noch kleinere Zahl vorgeschlagen worden. Es ist daher klar, dass sich für die Wahl der Periodenzahl keine feste Regel aufstellen lässt. Man muss hier die verschiedenartigsten Umstände, wie die Antriebsart und die Geschwindigkeit der Dynamomaschine, ihre Konstruktion und ihr zulässiges Gewicht in Rücksicht ziehen.

Wir wollen der Einfachheit halber nur untersuchen, welchen Einfluss die Periodenzahl der Maschine auf ihr Gewicht, ihren Preis und ihre Leistung ausübt.

Zu diesem Zweck vergleichen wir zwei Maschinen mit einander, die beide für dieselbe Spannung, Geschwindigkeit und Leistung konstruirt sind; nur möge die Maschine A eine doppelt so grosse Periodenzahl haben als die Maschine B. A möge 20 Pole besitzen und 540 Umdrechungen machen, so dass $N = 90$ ist, während B nur 10 Pole haben soll, so dass bei derselben Geschwindigkeit $N = 45$ ist. Da die Spannung proportional $\nu z p$ ist, so muss νz bei B doppelt so gross sein als bei A. Nun wollen wir zuerst annehmen, dass A und B gleich schwer sind, dass ferner z bei B doppelt so gross wie bei A, ν aber in beiden Fällen gleich ist. Jede Ankerspule von B, deren Zahl natürlich gleich der Polzahl sein muss, hat also doppelt so viel Windungen, wie eine solche von A, und ist, als Ganzes genommen, grösser, da sie von der doppelten Kraftlinienzahl durchdrungen wird. Die gesammte Drahtlänge auf dem Anker von B ist also grösser als auf dem von A. Anderseits kann man den Durchmesser des Ankers von B kleiner wählen, da die Zwischenräume zwischen den einzelnen Polen weniger Platz einnehmen. Denn bei B haben wir nur 10 solcher Zwischenräume, bei A aber 20. Letztere kann man auch nicht zu schmal machen, da sonst zu viel Kraftlinien verloren gehen. Da ferner B nur halb so viel Feldmagnete besitzt als A, so braucht man für die Erregungsspule von B weniger Draht und weniger Energie, wenn auch die einzelnen Magnetkerne hier stärker sind.

Soweit verhält sich die Maschine mit geringerer Periodenzahl günstiger. Wir wollen nun untersuchen, wie es mit der Selbstinduktion und der Rückwirkung des Ankers bei den beiden Maschinen steht. Das von der Selbstinduktion hervorgerufene Feld einer Ankerspule ist annähernd proportional dem Ankerstrom, der Windungszahl und den Dimensionen der Spule. Da die Stromstärke bei beiden Maschinen dieselbe ist, jede Spule von B aber doppelt so viele Windungen und etwa doppelt so grossen Querschnitt hat als eine Spule von A, so erzeugt die Selbstinduktion bei B ein vier Mal so starkes Feld als bei A. Die Leiter der Spule B schneiden dies Feld 45 mal, die der Spule A 90 mal in der Sekunde. Da das Produkt aus Periodenzahl und Anzahl der Leiter in einer Ankerspule für beide Maschinen gleich sein muss, so ist die Selbstinduktion in einer Ankerspule von B vier Mal grösser als in einer solchen von A. Weil jedoch A doppelt so viele Spulen besitzt als B, so wird die Selbstinduktion des ganzen Ankers der Maschine B nur zwei Mal so gross wie die der Maschine A sein. Befinden sich beide Maschinen in demselben Stromkreise und erleidet daher der Strom in beiden Ankern dieselbe Phasenverzögerung, so ist die Rückwirkung des Ankers auf das Feld von B doppelt so gross wie auf das von A. Werden jedoch die Maschinen in getrennten Stromkreisen als Generatoren verwandt, so ist die Phasenverzögerung von B in Folge der grössern Selbstinduktion grösser als die von A; folglich ist die Rückwirkung des Ankers mehr als doppelt so gross. Aus Allem geht hervor, dass die Charakteristik der elektromotorischen Kraft von A weniger stark abfällt als die von B.

Wollen wir diesen Abfall für die Maschine B verringern, so müssen wir ihre Selbstinduktion und die Rückwirkung ihres Ankers verkleinern. Dies geschieht, wenn wir z vergrössern und ν vermindern oder auch wenn wir den Widerstand des magnetischen Kreises vermehren, weil dadurch das von der Selbstinduktion erzeugte Feld geschwächt wird. Schlagen wir den ersten Weg ein, so nimmt das Gewicht der Maschine zu, während wir im zweiten Falle die erregende Kraft verstärken müssen; denn einem grössern magnetischen Widerstande entspricht eine grössere Kupfermenge auf den Feldmagneten und mehr erregende Energie. Obwohl also die Maschine mit kleinerer Periodenzahl weniger Kosten verursacht, da sie nicht so viel einzelne Theile enthält und der Durchmesser ihres Ankers kleiner ist, so werden diese Vortheile doch dadurch wieder in Frage gestellt, dass ihre Feldmagnete schwerer sein müssen, damit die Selbstinduktion und die Rückwirkung des Ankers nicht zu gross werden. Fassen wir diese Darlegungen zusammen, so folgt:

Eine Maschine mit hoher Periodenzahl und einer grossen Anzahl von Polen hat grosse Dimensionen und verursacht hohe Herstellungskosten, weil sie viele einzelne Theile enthält; sie kann dabei leicht sein. Ihre Charakteristik fällt wenig ab.

Eine Maschine mit niedriger Periodenzahl und einer kleinen Anzahl von Polen ist gedrungener, aber auch schwerer. Ihre Charakteristik fällt stark ab.

Es müssen jedoch bei der Wahl der Periodenzahl noch andere Umstände in Betracht gezogen werden, auf die wir noch kurz eingehen wollen. Wird der Wechselstrom auch zu Beleuchtungszwecken verwandt, so darf die Periodenzahl nicht zu niedrig sein, da sonst die Bogenlampen für das Auge nicht mehr erträglich sind. Anderseits darf man in Rücksicht auf die Kapacität der Leitung die Periodenzahl nicht zu hoch annehmen. Besteht die Leitung z. B. aus einem sehr langen koncentrischen Kabel, das hochgespannte Ströme fortleitet, so ist ein starker Strom nöthig, um die Leitung elektrostatisch zu laden. Dieser Ladungsstrom eilt der elektromotorischen Kraft um ein Viertel der Periode voraus und überträgt daher keine nutzbare Energie, während er Energie verzehrt, die sich in der Erwärmung der Leitung äussert. Die Stärke dieses Stromes ist der Periodenzahl proportional, die deshalb aus diesem Grunde möglichst niedrig gewählt werden muss.

Verwendet man bei einer Wechselstromanlage kleine Motoren, so ist auch für diese eine niedrige Periodenzahl günstig. Denn da die

Geschwindigkeit aller einphasigen und mehrphasigen Wechselstrommotoren, wie wir unten zeigen werden, der Periodenzahl direkt und der Zahl der Pole umgekehrt proportional ist, so muss man für kleine Geschwindigkeiten entweder eine niedrige Periodenzahl oder eine grosse Zahl von Polen anwenden. Weil aber das letztere Mittel bei kleinen Motoren nicht zulässig ist, so bleibt uns nur das erste übrig. In vielen Fällen müssen wir also bei der Wahl der Periodenzahl verschiedene Bedingungen gegen einander abwägen; die Erfahrung zeigt jedoch, dass Maschinen mit einer Periodenzahl von 40 bis 65 den meisten Anforderungen genügen.

Wir kommen nun auf die Kraftübertragung mittels Wechselstrom zurück und betrachten zuerst den einfachsten Fall, wo die Energie zwischen zwei gleichartigen einphasigen Maschinen mit Hülfe einer vollständig isolirten Leitung übertragen wird, die keine Selbstinduktion und keine Kapacität besitzt. Diese beiden Bedingungen sind in der Wirklichkeit nahezu bei oberirdischen Leitungen von nicht allzu grosser Länge verwirklicht. Ferner nehmen wir der Einfachheit halber an, dass die Rückwirkung des Ankers bei beiden Maschinen zu vernachlässigen und dass die Selbstinduktion sowohl für den Generator als für den Motor eine konstante gegebene Grösse ist. Die Maschinen mögen dieselbe Periodenzahl besitzen, und ihre erregende Kraft sei so bemessen, dass der Generator die Spannung E_1 (Volt) und der Motor die Spannung E_2 (Volt) annimmt. Der gesammte Widerstand des Stromkreises (d. h. der beiden Ankerwicklungen und der Leitung) sei gleich w (Ohm) und die Stromstärke gleich i (Ampère). Bezeichnen alsdann L_1 und L_2 die Selbstinduktionskoëfficienten für den Generator und Motor, so erhalten wir für die Selbstinduktion der beiden Maschinen

$$e_{s1} = 2\pi N L_1 i,$$

$$e_{s2} = 2\pi N L_2 i;$$

also zusammen

$$e_s = 2\pi N (L_1 + L_2) i.$$

Der Spannungsverlust in Folge des Widerstandes der Leitung ist

$$e_w = w i.$$

Wir wollen nun die verschiedenen Grössen in einem Vektordiagramm darstellen und dabei von der Stromstärke ausgehen. In Fig. 87 sei

OI der Radius Vektor des Stromes in dem Augenblicke, wo seine Stärke durch Null hindurchgeht, und OW der Spannungsverlust im Widerstande der Leitung. Nach dem Vorigen ist es klar, dass die Komponente der elektromotorischen Kraft, welche die Selbstinduktion überwinden soll, dem Strome um ein Viertel der Periode vorauseilen muss, d. h. der entsprechende Radius Vektor e_s verläuft vertikal nach oben und fällt mit Oy zusammen. Aus der obigen Formel ergiebt sich der Werth von e_s; er sei durch die Strecke OS dargestellt. Die beiden Maschinen müssen nun so laufen, dass in dem Stromkreise gleichzeitig die elektromotorischen Kräfte $e_w = OW$ und $e_s = OS$ entstehen, die sich zu der Resultante $e = OA$ zusammensetzen, weil nur dann die Stromstärke OI herrschen kann. Die Richtung des

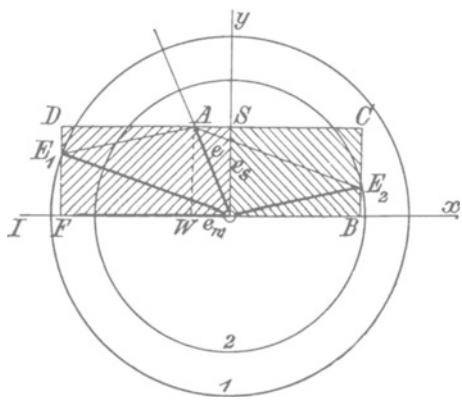


Fig. 87.

Radius Vektors OA ist von der Stromstärke unabhängig und durch die Tangente des Winkels AOI gegeben, und zwar haben wir

$$\operatorname{tg} AOI = \frac{2\pi N(L_1 + L_2)}{w}.$$

Denken wir uns nun die beiden Kreise 1 und 2 beschrieben, deren Radien den elektromotorischen Kräften des Generators und des Motors proportional sind, so kommt es darauf an, die Lage der Radien Vektoren für diese elektromotorischen Kräfte zu finden. Diese sind die Seiten eines Parallelogramms, dessen eine Diagonale gleich OA ist. Es sind nur zwei solcher Parallelogramme möglich, von denen das eine in Fig. 87, das andere in Fig. 88 gezeichnet ist. In dem ersten Falle liegt OE in demselben Quadranten wie OI, d. h. Strom und elektromotorische Kraft haben gleiche Richtung; die Maschine mit der elektromotorischen Kraft OE_1 dient demnach als Generator und giebt Energie an den Strom ab. Der Radius Vektor OE_2 liegt dagegen auf der entgegengesetzten Seite von OI, d. h. der Strom und die elektromotorische Kraft haben im Anker der zweiten Maschine verschiedene Richtungen, die Maschine wirkt also als Motor. Da nach der Figur $OE_1 > OE_2$ ist, so wirkt die Maschine mit der stärkern elektromotorischen Kraft als Generator. Es kann aber auch umgekehrt sein, wie der in Fig. 88 dargestellte Fall zeigt. Hier liegt OE_2 auf derselben Seite und OE_1 auf der entgegengesetzten Seite von OI. Folglich wirkt die Maschine mit der schwächern

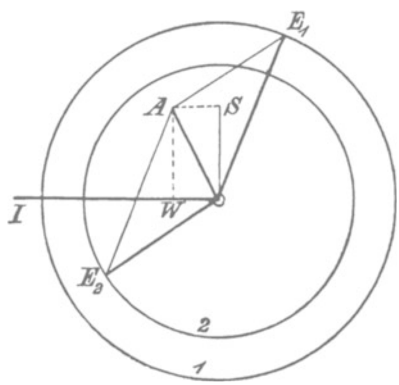


Fig. 88.

elektromotorischen Kraft als Generator und die mit der stärkern als Motor. In dieser Beziehung unterscheiden sich die Kraftübertragungen mittels Wechselstroms vollständig von den Gleichstromanlagen. Bei diesen muss der Generator unter allen Bedingungen eine höhere elektromotorische Kraft haben als der Motor.

Die Leistung, welche im ersten Falle (Fig. 87) nach dem Motor übertragen wird, ist gleich $\overline{OB} \times i$ (Watt). Von dem Generator wird die Leistung $\overline{OF} \times i$ an die Leitung abgegeben. Da

$$i = \frac{e_s}{2\pi N(L_1 + L_2)},$$

so ergiebt sich, dass das Rechteck $OSCB$ der auf den Motor übertragenen, das Rechteck $OSDF$ der vom Generator gelieferten und das Rechteck $OSAW$ der im Widerstande verlorenen Leistung proportional ist. Drücken wir die Seitenlängen dieser Rechtecke in Volt aus und dividiren wir dann ihre Flächeninhalte durch $2\pi N(L_1+L_2)$, so erhalten wir die Leistungen in Watt.

Aus dem Diagramm ersieht man auch, was geschieht, wenn bei konstanter Belastung des Motors seine erregende Kraft und damit seine Ankerspannung gesteigert wird. Da der Flächeninhalt von $OSCB$, der die Belastung des Motors darstellt, nach unserer Annahme kon-

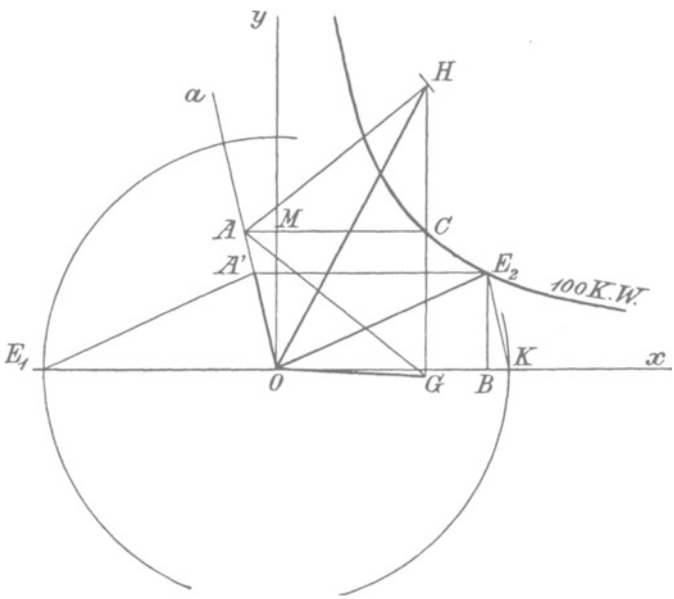


Fig. 89.

stant bleiben soll, so bewegt sich der Punkt auf einer gleichseitigen Hyperbel, und seine Lage hängt von der elektromotorischen Kraft des Motors ab, da an der Spannung des Generators nichts geändert wird. Ein Beispiel hierfür giebt Fig. 89, die unter folgenden Voraussetzungen gezeichnet ist: $E_1 = 1000$, $w = 1$, $N = 50$, $L_1 + L_2 = 0{,}0127$, $2\pi N(L_1 + L_2) = 4$, $e_s = 4i$, $e_w = i$ und die an den Motor übertragene Leistung $A_2 = 100$ Kilowatt. Durch den letzten Werth ist die Lage der Hyperbel gegeben. Die Lage des Radius Vektor Oa der resultirenden elektromotorischen Kraft ist dadurch bestimmt, dass die Selbstinduktion vier Mal grösser ist als der Spannungsverlust im Widerstande der Leitung. Wählen wir nun einen beliebigen Punkt C auf der Hyperbel, so liegt der Endpunkt des Radius Vektor, der die elektromotorische Kraft des Motors darstellt, auf der Vertikalen durch C; der Endpunkt des Radius Vektor der resultirenden elektromotorischen Kraft muss auf der Horizontalen durch C und gleichzeitig auf der Linie Oa liegen, er ist also der Schnittpunkt A beider. Schlagen wir ferner mit einem Radius gleich 1000 Volt um A als Mittelpunkt einen Kreis, so schneidet dieser die Vertikale durch C in den Punkten G und H; dies sind also die Endpunkte für die Radien Vektoren der elektromotorischen Kraft des Motors. Man erhält dieselbe Stromstärke für die beiden Werthe OH und OG der elektromotorischen Kraft, die in unserm Falle sehr stark von einander abweichen; sie betragen nämlich 680 und 1370 Volt. Hätten wir den Punkt C noch höher auf der Hyperbel angenommen, so wäre der Unterschied zwischen OH und OG noch grösser ausgefallen. Projiciren wir den Punkt C auf die vertikale Achse Oy nach M, so wird OM ein Maass für die Stromstärke. Damit der Theil der Leistung, der im Stromkreise in Wärme umgesetzt wird, ein Minimum ist, muss daher OM ein Minimum werden und C möglichst tief auf der Hyperbel liegen. Man erhält diesen Punkt, wenn man durch K eine Parallele zu Oa legt, welche die Hyperbel in E_2 schneidet. Der entsprechende Punkt auf Oa ist A'. Die Spannung OE_2^* des Motors beträgt in diesem Falle nahezu 1000 Volt; die Stromstärke in der Leitung ist alsdann ein Minimum und daher der Wirkungsgrad der Kraftübertragung ein Maximum. Die elektromotorische Kraft des Generators hat gleiche Phase mit dem Strome, und die Leistung des Generators wird durch das Produkt aus Stromstärke und elektromotorischer Kraft dargestellt.

Die Beziehung zwischen der Spannung des Motors und der Stromstärke in der Leitung bei konstanter Belastung lässt sich noch in anderer Weise darstellen, wie Fig. 90 zeigt. Hier sind die Werthe der Spannung als Abscissen und die entsprechenden Stromstärken als Ordinaten aufgetragen. Aus der so gewonnenen Kurve sieht man, dass jedem Werthe der Stromstärke im Allgemeinen zwei verschiedene Werthe der elektromotorischen Kraft entsprechen, von denen der kleinere eine geringe, der grössere eine starke Phasenverschiebung im Gefolge hat. Wie wir oben gezeigt haben, schwächt ein Strom, der in der Phase der elektromotorischen Kraft vorauseilt, das Feld des Motors, und zwar um so mehr, je grösser die Phasenverschiebung ist. Daraus folgt, dass die Rückwirkung des Ankers bei einem Motor nur günstig wirkt, da sie bei zu starker Erregung das Feld schwächt, während bei einem zu schwach erregten Motor der umgekehrte Fall eintreten kann. Im Interesse der Sicherheit und des Wirkungsgrades der Anlage ist es daher am besten, mit der Spannung über jenen Werth hinauszugehen, den die Theorie als günstigsten vorschreibt. Denn nimmt sie unter diesem Werthe weiter ab, so wächst die Stromstärke bis zu einem kritischen Punkte an, dessen Ordinate die Kurve (Fig. 90) noch berührt, aber nicht mehr schneidet. Gehen wir noch weiter mit der erregenden Kraft

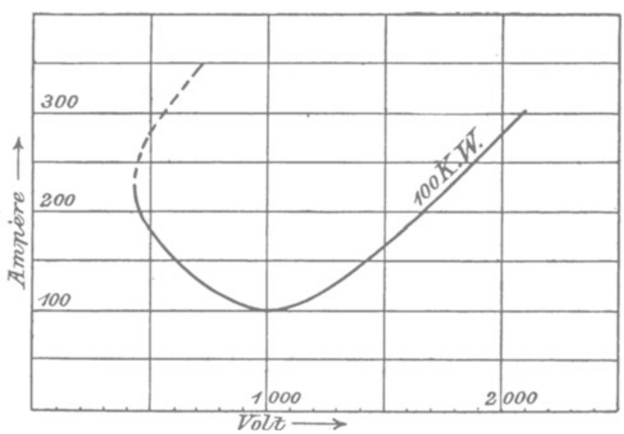


Fig. 90.

hinunter, so treffen die Ordinaten die Kurve gar nicht mehr, d. h. der Motor kann unter jenen Bedingungen nicht mehr laufen und kommt zu Ruhe. Dasselbe tritt ein, wenn die elektromotorische Kraft etwas unterhalb des kritischen Punktes liegt und die Belastung des Motors gelegentlich vergrössert wird. Da auf dem rechten Aste der Kurve kein kritischer Punkt vorhanden ist, so wählt man am besten die erregende Kraft etwas grösser, als dem theoretisch günstigsten Werthe entspricht, da alsdann eine kleine Aenderung der erregenden Kraft oder der Belastung der Anlage keinen Schaden bringt.

Von besonderer Wichtigkeit ist die Frage, welche Ueberlastung man einem Motor zumuthen kann, ohne dass er aus dem Tritt fällt. Denn bei den Kraftübertragungsanlagen lässt sich die Belastung der einzelnen Motoren nie genau festsetzen. Reichen z. B. 100 P dazu hin, unter den gewöhnlichen Bedingungen die Maschinen einer Fabrik mit Kraft zu versorgen, so kann diese Grenze natürlich zeitweilig bedeutend überschritten werden, wenn eine grosse Werkzeugmaschine in Gang gesetzt wird. Für solche Fälle muss noch immer ein gewisser Energievorrath in Reserve gehalten werden. Die Aufgabe lässt sich daher folgendermaassen stellen: Die Antriebsmaschine des Generators soll so zu reguliren sein, dass uns für kurze Zeit eine grössere Energiemenge zur Verfügung steht; welchen Ueberschuss über die normale Leistung kann alsdann der Generator aufnehmen und der Motor abgeben, ohne dass der Betrieb unterbrochen wird? Gleichstrommaschinen können bekanntlich stark überlastet werden; das Verhalten der Wechselstrommaschinen in dieser Beziehung ist im Folgenden näher zu untersuchen.

Wir wählen zu diesem Zweck als Beispiel die Maschine, auf die sich Fig. 89 und Fig. 90 beziehen. Für den normalen Bedarf der Fabrik seien 93 Kilowatt erforderlich. Ferner mögen 7 Kilowatt für die Erregung des Motors, für Wirbelströme und Verluste in Folge der Hysteresis (der Widerstand des Ankers ist schon in w eingeschlossen) verzehrt werden, so dass unter normalen Verhältnissen 100 Kilowatt durch den Strom zu liefern sind. Ist der Energiebedarf der Fabrik gleich Null, so sind nur 7 Kilowatt zu übertragen, um die verschiedenen Verluste zu decken; steigert sich dagegen der Bedarf über 93 Kilowatt hinaus, so wird die Leistung des Motors so lange den normalen Werth überschreiten, bis der kritische Punkt erreicht ist und das ganze System in Unordnung geräth.

Wir vernachlässigen bei der Betrachtung wieder die Rückwirkung des Ankers, sowie die Kapacität der Leitung und nehmen an, dass der gesammte Widerstand des Stromkreises 1 Ohm beträgt und dass bei der Periodenzahl $N = 50$ die Selbstinduktion $e_s = 4\,i$ ist. Fände die Kraftübertragung mittels Gleichstroms statt, so würden 100 Kilowatt durch einen Strom von 100 A und 1000 V an den Motor übertragen, und wäre der Wirkungsgrad der Anlage gleich 90 %, so müsste an den Klemmen des Generators eine Spannung von 1100 V herrschen. Der Wechselstromgenerator sei daher so erregt, dass seine effektive elektromotorische Kraft 1100 V beträgt; die erregende Kraft des Motors soll aus den oben angeführten Gründen so bemessen sein, dass seine elektromotorische Kraft etwas grösser ist, nämlich 1150 V.

Die Betriebsverhältnisse der Anlage sind alsdann nach folgenden Daten zu berechnen:

$$E_1 = 1100\,; \quad E_2 = 1150\,; \quad e_w = i\,; \quad e_s = 4\,i\,; \quad w = 1\,;$$

$$N = 50\,; \quad L_1 + L_2 = 0{,}0127\,; \quad e = 4{,}123\,i\,; \quad i = 0{,}242\,e.$$

Zuerst müssen wir uns vergewissern, ob die Stromstärke nicht zu sehr ansteigt, wenn der Motor soweit überlastet wird, dass er stehen bleibt. Tritt dies ein, so ist $E_2 = 0$; die ganze elektromotorische Kraft des Generators (in unserm Falle 1100 V) wird also dazu verbraucht, den Widerstand und die Selbstinduktion des Stromkreises zu überwinden. Die resultirende elektromotorische Kraft e ist daher 1100 V, wenn wir die Rückwirkung des Ankers vernachlässigen. Die Stromstärke ist $0{,}242 \times 1100 = 266$ A, also 2,5 mal höher als unter normalen Verhältnissen. Ob sie die Ankerwicklungen beschädigen wird, hängt von deren Widerstand ab. Da der gesammte Widerstand des Kreises 1 Ohm beträgt, so gehen im Ganzen nur 71 Kilowatt verloren, also weniger, als der Motor bei normaler Belastung verbraucht. Hiervon wird der grösste Theil in der Leitung verzehrt, der Rest erwärmt die Anker. Nun sind die Ankerwiderstände der neuern Maschinen sehr klein. Man kann Wechselstrommaschinen konstruiren, bei denen der Spannungsverlust im Anker 2 %, ja sogar 1 % nicht überschreitet. Bei den Maschinen des Verfassers, auf die sich die obigen Angaben beziehen, beträgt der Verlust bei voller Belastung 1,25 %. Wir hätten also bei 100 A und 1100 V einen Verlust von 14 V in jedem Anker und bei 226 A einen Verlust von 37 V (3,5 % der Klemmenspannung). Die entsprechende Energiemenge beträgt für jeden Anker also noch nicht 10 Kilowatt und dürfte keine übermässige Erhitzung der Wicklung herbeiführen. In Wirklichkeit wird dieser Werth jedoch nicht einmal erreicht, wenn man die Maschine so konstruirt, dass die Rückwirkung des Ankers das Feld stark schwächt.

Wir haben jetzt zu untersuchen, ob die Anlage durch die Ueberlastung des Motors auch in mechanischer Beziehung nicht zu sehr beansprucht wird. Obgleich der Generator nur 71 Kilowatt an die Leitung abgiebt, wenn der Motor durch Ueberlastung zum Stillstande gebracht wird, so ist die Anziehungskraft, die die Polschuhe und Ankerspulen des Generators auf einander ausüben, doch viel grösser, als dieser Leistung unter normalen Verhältnissen entsprechen würde.

Das geht deutlich aus Fig. 91 hervor, wo oe die resultirende elektromotorische Kraft, die in diesem Falle mit der elektromotorischen Kraft E_1 des Generators zusammenfällt, und oi die Stromstärke bezeichnet. Da es sich jetzt um die augenblicklichen Werthe handelt, so haben wir auf den Radien Vektoren die maximalen und nicht die effektiven Werthe abzutragen. oe ist also $= 1100\sqrt{2} = 1540$ V und $oi = 266\sqrt{2} = 373$ A. Die Anziehungskraft, die auf die Ankerspulen ausgeübt wird, ist nun dem Produkt der augenblicklichen Stromstärke in die augenblickliche Feldstärke, oder auch dem Produkt aus ersterer in die augenblickliche elektromotorische Kraft proportional und möge daher in passendem Maassstabe durch das Produkt der Projektionen von oe und oi auf die Vertikale dargestellt werden. Wir haben also

$$\text{Anziehungskraft} = OA \times OB.$$

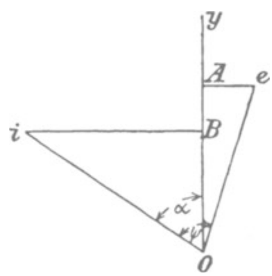


Fig. 91.

Liegen A und B beide oberhalb oder unterhalb von O, so ist die Zugkraft positiv, dagegen negativ, wenn A und B auf verschiedenen Seiten von O liegen, und Null, wenn e und i das Zeichen wechselt. Es ist nun die Frage, in welcher Phase das Produkt $OA \times OB$ ein Maximum ist und wie sich dieser maximale Werth zu der normalen Anziehungskraft verhält, welche die Maschine bei voller Belastung aushalten muss. Im letzten Falle ist $i = 140$ und $E = 1540$, und nehmen wir an, dass die Stromstärke und die elektromotorische Kraft in gleicher Phase sind, so wechselt die Anziehungskraft nie das Zeichen, und ihr Maximum ist proportional 215000. Läuft der Generator bei kurz geschlossenem Stromkreise, so ergiebt sich die Phasenverschiebung ψ zwischen e und i zu 76^0, da $e_w : e_s = 1 : 4$ ist. Gilt Fig. 91 für die Phase α, so ist offenbar

$$OA \times OB = ei \cos(\psi - \alpha) \cos \alpha.$$

Um zu sehen, wann dieser Ausdruck ein Maximum wird, differenziren wir ihn nach α und setzen den Differentialquotienten gleich Null. Dies ergiebt

$$\operatorname{tg}\psi = \frac{2\operatorname{tg}\alpha}{1-\operatorname{tg}^2\alpha} = \frac{2\sin\alpha\cos\alpha}{\cos^2\alpha-\sin^2\alpha} = \operatorname{tg}(2\alpha),$$

d. h.

$$\alpha = \frac{\psi}{2}.$$

Das Maximum der Anziehungskraft tritt also dann auf, wenn die Vertikale den Winkel zwischen den Radien Vektoren der Stromstärke und der elektromotorischen Kraft halbirt; in diesem Augenblick ist $\alpha = 38^0$, $\cos\alpha = 0{,}788$ und die Anziehungskraft

$$O\,A \times O\,B = 1540 \times 373 \times (0{,}788)^2 = 356000.$$

Sie ist also nur 1,7 mal so gross wie beim normalen Betrieb der Maschine. Eine so geringe Zunahme der Anziehungskraft bringt keine Störung im Gange der Dampfmaschine hervor, besonders wenn dieser Umstand schon bei der Konstruktion berücksichtigt worden ist.

Wir wollen nun zu der graphischen Darstellung der Betriebsverhältnisse übergehen und hierfür den Zeitpunkt wählen, wo die elektromotorische Kraft des Generators ihren positiven maximalen Werth OE_1 (Fig. 92) erreicht hat; der Endpunkt des Radius Vektor für die elektromotorische Kraft des Motors möge nach E_2 auf den Kreis von 1150 V fallen. Aus der Lage von OE_1 und OE_2 ergiebt sich ohne Weiteres die Resultante e; und da uns die Beziehung zwischen e_w und e_s bekannt ist, so finden wir auch den Winkel θ, um den die Komponente der elektromotorischen Kraft, die die Selbstinduktion überwindet, gegen die Resultante e voreilt, und können die Strecken e_w und e_s eintragen. Der Radius Vektor der Stromstärke steht senkrecht auf e_s, und seine Länge ergiebt sich aus der Gleichung $i = 0{,}242\,e$. Der Winkel θ beträgt 14^0. Um die Leistung zu finden, die der angenommenen Lage von E_2 entspricht, verlängern wir OE_2 über O hinaus und projiciren auf diese Verlängerung den Punkt i nach i_2. Drücken wir Oi_2 in Ampère aus und multipliciren die gefundene Zahl mit 1150, so erhalten wir die Leistung in Watt, die an den Motor übertragen wird. Diese Zahl der Watt kann im beliebigen Maassstabe auf OE_2 abgetragen werden und mag durch die Strecke Oa_2 dargestellt sein. Projiciren wir ferner i auf OE_1 nach i_1 und multipliciren Oi_1 (in Ampère) mit 1100, so erhalten wir auf ähnliche Weise die Leistung des Generators in Watt; sie möge durch die Strecke Oa_1 dargestellt werden. Alsdann ist natürlich der Unterschied $Oa_1 - Oa_2 = a_1 a_2$ gleich dem Effektverlust wi^2 in der Leitung. Lassen wir den Punkt E_2 auf dem Kreise von 1150 V wandern, so können wir auf diese Weise eine Reihe von Punkten für die entsprechenden Leistungen des Generators und

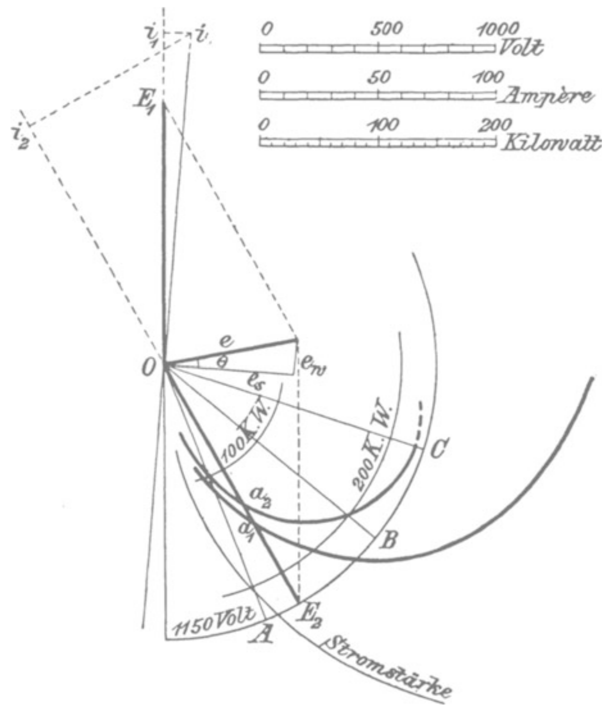


Fig. 92.

Motors finden, die alle auf den beiden stark ausgezogenen Energiekurven liegen. Vernachlässigen wir den Widerstand der Leitung, so fallen natürlich diese beiden Kurven in eine einzige zusammen; diese bildet einen Kreis, dessen Mittelpunkt in die horizontale Achse fällt.

Durch die Energiekurven lässt sich der Betrieb der Anlage bei wechselnder Belastung sehr gut veranschaulichen. Werden z. B.

100 Kilowatt an den Motor übertragen, so fällt der Radius Vektor seiner elektromotorischen Kraft nach OA. Nimmt die Belastung des Motors alsdann ab, so bewegt sich OA nach der Vertikalen hin. Verstärkt man dagegen plötzlich die Belastung, so wird die Bewegung etwas verlangsamt, der Strom im Anker wird also noch mehr in der Phase verzögert, und OE_2 bewegt sich von der Vertikalen weg. Die Veränderung erfolgt, wie aus dem Diagramm ersichtlich, im richtigen Sinne, denn der Anker kann wegen der Phasenverschiebung mehr mechanische Energie abgeben; wir arbeiten also unter vollkommen stabilen Verhältnissen. Wird die Belastung auf 200 Kilowatt erhöht, so rückt der Radius Vektor der elektromotorischen Kraft des Motors nach OB. Es ist selbst noch eine weitere Steigerung der Leistung möglich, jedoch nur noch wenig. Denn haben wir 224 Kilowatt erreicht und ist der Radius Vektor dementsprechend nach OC gewandert, so haben wir die äusserste Grenze der Belastung erreicht, für die die Betriebsbedingungen stabil bleiben. Die Stromstärke ist dadurch sehr angewachsen, wie sich aus dem Verlauf der Stromkurve erkennen lässt, während der Wirkungsgrad sehr klein ist. Bei weiterer Steigerung der Belastung rückt der Radius Vektor der elektromotorischen Kraft des Motors noch weiter nach oben, während die verfügbare Leistung noch mehr abnimmt, sodass der Motor stehen bleibt. Jedenfalls kann man aber, wie sich aus dem mitgetheilten Beispiel ergiebt, die normale Leistung auf mehr als das Doppelte steigern, ehe die Anlage versagt.

Wir haben nun noch zu untersuchen, ob wir, wie es bisher geschehen ist, den Einfluss vernachlässigen können, den die Rückwirkung des Ankers auf diese Vorgänge ausübt. Im Allgemeinen ist das nicht gestattet; die Rückwirkung des Ankers hängt jedoch sehr von der Konstruktion der Maschinen ab und kann oft äusserst gering sein. Aber bei Kraftübertragungen muss man den Maschinen immer eine grosse Selbstinduktion geben, damit die Anlage bei einer Ueberlastung des Motors nicht versagt; in Folge dessen darf man die Windungszahl des Ankers nicht zu klein wählen und erhält also eine grosse Anzahl von Ampèrewindungen, die das Feld schwächen. Diesem Nachtheil lässt sich freilich dadurch entgegenwirken, dass man die Feldmagnete sehr stark erregt und über dem Knie der Charakteristik arbeitet; doch ist dies aus naheliegenden Gründen nicht empfehlenswerth.

Um den Einfluss zu untersuchen, den die Rückwirkung des

Ankers ausübt, muss uns die Charakteristik der Maschine bekannt sein. Diese kann in derselben Weise im Voraus bestimmt werden, wie wir es oben bei den Gleichstrommaschinen angegeben haben. Die in Fig. 93 gezeichnete Kurve soll die im Voraus bestimmte Charakteristik unserer Wechselstrommaschinen darstellen; und zwar mögen die Ordinaten die effektive Spannung des Ankers für eine Geschwindigkeit von 500 Umdrehungen in der Minute angeben und die Abscissen die Ampèrewindungen der Feldmagnete. Generator und Motor mögen in jeder Hinsicht einander gleich sein; beide sollen mit 12 Polen ausgerüstet sein und 288 Leiter auf dem Anker besitzen. Es kommen also auf eine Ankerspule 24 Leiter, und nach

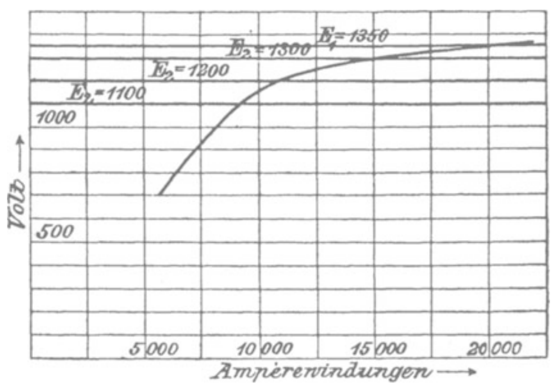


Fig. 93.

Formel (56) ist die Rückwirkung des Ankers auf die Feldmagnete in Ampèrewindungen (A.W.)

$$x = 0{,}374\, i\, q\,.$$

Wurde der Motor durch Ueberlastung zum Stillstehen gebracht, so betrug die Stromstärke unter Vernachlässigung der Rückwirkung des Ankers 266 A und die Phasenverzögerung 76^0. Setzen wir diese Werthe in Formel (56) ein, so erhalten wir

$$x = 7560.$$

Aus der Charakteristik (Fig. 93) ergiebt sich, dass eine erregende Kraft von 9000 A.W. dazu erforderlich ist, eine Spannung von 1100 V hervorzubringen. Bleibt der Strom in der Phase hinter der elektromotorischen Kraft zurück, so schwächt er das Feld; wird also auf irgend eine Weise die Stromstärke von 266 A konstant gehalten, so ist die erregende Kraft gleich 9000—7560 = 1440 A.W. In dem Anker würde alsdann nur eine Spannung von 200 V inducirt. Da nun aber die Stromstärke nur durch die elektromotorische Kraft des Ankers hervorgebracht werden kann, so wird letztere nicht in so starkem Maasse vermindert. Wir können die effektive elektromotorische Kraft durch ein Näherungsverfahren berechnen, indem wir verschiedene zwischen 200 und 1100 V liegende Werthe für sie einsetzen und unter ihnen denjenigen aussuchen, für den der Ankerstrom die erregende Kraft um den richtigen Betrag verkleinert. Dies Verfahren soll hier nicht im Einzelnen durchgeführt werden; wir wollen vielmehr sofort das Resultat angeben: Bei einer elektromotorischen Kraft von 600 V übt der Ankerstrom von 150 A auf das Feld eine entmagnetisirende Wirkung von 4250 A.W. aus. Es bleiben also für die Erregung des Feldes 9000—4250 = 4750 A.W. übrig, die nach dem Verlauf der Charakteristik eine Spannung von 610 V hervorbringen. Bleibt also der Motor in Folge von Ueberlastung stehen, so beträgt die Stromstärke nur 150 A, während wir vorher unter Vernachlässigung der Rückwirkung des Ankers eine solche von 266 A fanden.

Korrigirt man die Konstruktion von Fig. 92 unter Berücksichtigung der Charakteristik (Fig. 93), so lassen sich auch die Werthe für die Leistung des Motors bei normalem Betriebe finden. Bei geringer Leistung des Generators kann die Phase des Stromes gegen die der elektromotorischen Kraft nach vorn oder nach hinten verschoben sein; bei hohen Leistungen, die den Verhältnissen beim Stehenbleiben des Motors entsprechen, wird der Strom jedoch hinter der elektromotorischen Kraft des Generators zurückbleiben. Im Motor eilt der Strom bei allen Belastungen vor. Das Feld des Generators wird also bei wachsender Belastung zuerst verstärkt und darauf geschwächt, während das Feld des Motors von Anfang an geschwächt wird, und zwar um so stärker, je mehr die Belastung wächst. Aus diesem Grunde ist es rathsam, den Motor mit einer höhern Spannung zu betreiben als den Generator, wie wir schon oben bemerkt haben. Lassen wir den Generator in der Nähe oder etwas unter dem Knie der Charakteristik arbeiten, so kann ein Kurzschluss die Anlage nicht schädigen; der Motor muss aber über dem Knie der Charakteristik arbeiten, damit wir ihn stark überlasten können.

Es möge der Generator mit 9000 A.W. erregt werden, so dass seine Spannung 1100 V beträgt. Wählen wir alsdann nach einander 10800, 15000 und 18500 A.W. für die Erregung des Motors (entsprechend einer Spannung von 1200, 1300 und 1350 V), so können wir in jedem Falle die Energiekurven konstruiren und daraus ohne Weiteres entnehmen, wie stark sich der Motor überlasten lässt. Man probirt auch hier wieder verschiedene Werthe für E_1 und E_2, bis man die passenden findet. Wir wollen dies einfache, wenn auch etwas langwierige Verfahren hier nicht näher beschreiben, die Resultate sind in Fig. 94, 95 und 96 angegeben. Die Energiekurve des Generators ist überall fortgelassen und nur die des Motors ge-

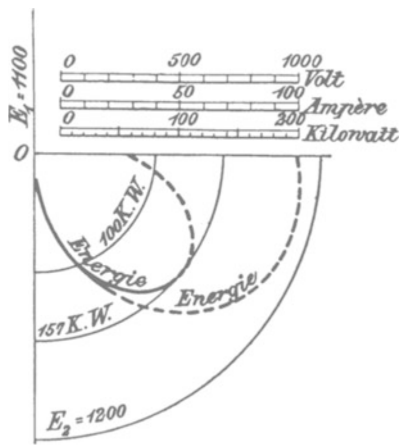


Fig. 94.

zeichnet. In Fig. 94 stellt die punktirte Linie die Energiekurve unter Vernachlässigung der Rückwirkung des Ankers dar. Bis zu der normalen Belastung von 100 Kilowatt fallen beide Kurven zusammen, für höhere Belastungen des Motors divergiren sie stark; die höchste zulässige Belastung wird durch die Rückwirkung des Ankers sehr herabgedrückt. Die Figur zeigt in schlagender Weise, dass die Rückwirkung des Ankers bei Kraftübertragungsanlagen nicht zu vernachlässigen ist, besonders wenn man feststellen will, wie hoch die Ueberlastung des Motors gesteigert werden darf. Im vorliegenden Falle versagt die Anlage, wenn 157 Kilowatt an den Motor übertragen werden. Da 7 Kilowatt auf die Erregung und die Verluste im Motor entfallen, so können im Maximum 150 Kilowatt als Nutzarbeit vom Motor abgegeben werden. Nun beträgt die normale Leistung 93 Kilowatt; sie kann also nur um 60 % gesteigert werden, ohne dass die Anlage versagt.

Es wäre jedoch gefährlich, sich auf eine Anlage zu verlassen, die nur um 60 % ihrer normalen Leistung überlastet werden kann. Um die Sicherheitsgrenze zu erhöhen, müssen wir den Motor stärker erregen. Fig. 95 stellt die Energiekurve dar, wenn der Motor mit 1500 A.W. erregt wird und eine Spannung von 1300 V besitzt. Es ist auch hier die Stromkurve gezeichnet, aus deren Verlauf man auf die Stromstärke schliessen kann, die einer gegebenen Belastung

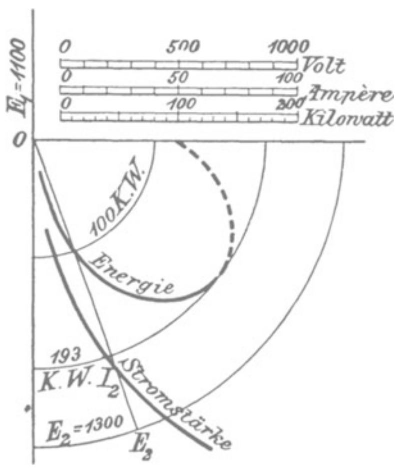


Fig. 95.

des Motors entspricht. So wird dem Motor z. B. bei einer Belastung von 93 Kilowatt eine Energie von 100 Kilowatt in der Sekunde zugeführt; die Phase seiner elektromotorischen Kraft wird in diesem Falle durch den Radius Vektor $O\,E_2$ dargestellt, der die Stromkurve im Punkte I_2 schneidet. Drücken wir $O\,I_2$ nach dem nebenstehenden Maassstabe in Ampère aus, so erhalten wir eine Stromstärke von 103 A. Der Verlust in Folge des Widerstandes der Leitung ist gleich 10,6 Kilowatt; ferner verlieren wir noch 14 Kilowatt in den beiden Maschinen, so dass der gesammte Verlust 24,6 Kilowatt beträgt. Am Motor sind 93 Kilowatt verfügbar und an den Generator werden von der Dampfmaschine 117,6 Kilowatt abgegeben. Der Wirkungsgrad ist daher gleich $93 : 117{,}6 = 79\,\%$. Die Anlage versagt, wenn an den Motor 193 Kilowatt übertragen werden. Ziehen wir hiervon 7 Kilowatt für die innern Verluste ab, so ergiebt sich, dass für den Motor noch eine Leistung von 186 Kilowatt zulässig ist. Er kann also bis zu $100\,\%$ überlastet werden.

Wollen wir eine noch höhere Ueberlastung möglich machen, so muss der Motor noch stärker erregt werden. In Fig. 96 ist die Energiekurve für den Fall dargestellt, dass der Motor mit 18500 A.W. erregt wird und eine Spannung E_2 von 1350 V liefert. Die Anlage

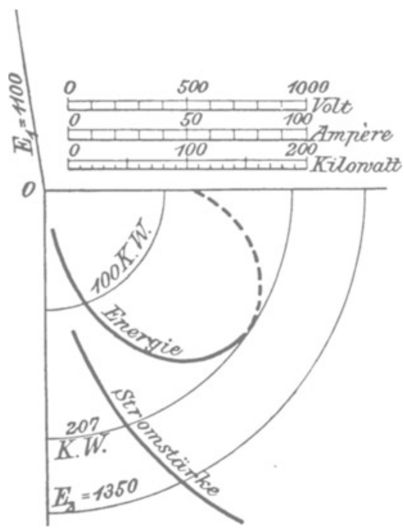


Fig. 96.

versagt hier erst, wenn die Belastung 200 Kilowatt beträgt, die normale Leistung also um $134\,\%$ übertrifft.

Diese Resultate sind in der folgenden Tabelle zusammengestellt:

Spannung des Generators	1100 V	1100 V	1100 V
Spannung des Motors	1200 V	1300 V	1350 V
Normale Leistung des Motors	93 K.W.	93 K.W.	93 K.W.
Maximale zulässige Leistung des Motors	150 K.W.	186 K.W.	200 K.W.
Zulässige Ueberlastung des Motors . .	60 %	100 %	134 %

Dieselbe Methode, die wir für die Untersuchung dieses besondern Falles durchgeführt haben, lässt sich auf ähnliche Anlagen anwenden und führt zu folgenden allgemeinen Schlussfolgerungen.

Der Widerstand der Leitung und der Maschinen ist möglichst niedrig zu wählen, weil sonst der Wirkungsgrad und die höchste zulässige Belastung herabgesetzt werden. Dies gilt nicht nur für Kraftübertragungen, sondern überhaupt für solche Stromkreise, in denen mehrere Generatoren oder Motoren parallel geschaltet sind.

Mässige Selbstinduktion und nicht zu starke Rückwirkung des Ankers wirken beim Generator günstig, weil alsdann die Anlage bei einem Kurzschluss keine Störung erfährt.

Dagegen soll die Selbstinduktion und die Rückwirkung des Ankers beim Motor möglichst klein sein.

Sind der Motor und der Generator Maschinen von derselben Grösse und gleicher Konstruktion, so ist der Motor stärker zu erregen als der Generator. Es ist jedoch günstiger, dem Motor eine geringere Anzahl von Leitern auf dem Anker zu geben, als dem Generator. Denn dann ist die Selbstinduktion und die Rückwirkung des Ankers beim Motor kleiner, und dieser braucht nicht stärker erregt zu werden als der Generator. Unter allen Umständen soll der Motor jedoch so stark erregt werden, dass er oberhalb des Knies seiner Charakteristik arbeitet.

Bis jetzt haben wir bei unsern Berechnungen von dem Einfluss der Kapacität abgesehen. Es ist dies auch in den meisten Fällen statthaft, wo die Kapacität so klein ist, dass man sie vernachlässigen kann. So lässt sich eine Luftleitung von wenigen Kilometer Länge so anlegen, dass ihre Kapacität nur einen Bruchtheil eines Mikrofarads beträgt; der Ladungsstrom, der in diesem Falle in der Leitung hin und her fliesst, ist im Verhältnis zu dem Arbeitsstrom so gering, dass er den Betrieb der Anlage nicht beeinflusst. Wird die Kraft aber auf grössere Entfernungen hin übertragen, so wächst einerseits die Kapacität der Leitung, anderseits müssen wir auch höhere Spannungen anwenden. In Folge dessen nimmt die Stärke des Ladungsstroms schnell zu. Ferner giebt es Fälle, wo man eine Luftleitung nicht verwenden kann, sondern zu koncentrischen Kabeln greifen muss, die bedeutende Kapacität besitzen. So hat das Ferranti'sche Kabel zwischen Deptford und London eine Kapacität von 0,23 Mikrofarad für das Kilometer, und wollte man mittels eines solchen Kabels Energie über eine Entfernung von 32 km bei einer Spannung von 10000 V und bei einer Periodenzahl von 50 übertragen, so würde ein Ladungsstrom von 23 A auftreten.

Bedeutet C die Kapacität eines Kondensators, der mit einer Wechselstromquelle von der Spannung e verbunden ist, und i die momentane Stromstärke, so erfährt die Ladung des Kondensators während der Zeit dt, wo sich e um den Betrag de ändert, einen Zuwachs $i\,dt = C\,de$.

Nun ist

$$i = I \sin 2\pi Nt,$$

also auch

$$I \sin 2\pi Nt\,dt = C\,de.$$

Der Kondensator wird offenbar durch den Strom vollständig geladen, der innerhalb eines Viertels der Periode, während die elektromotorische Kraft e von 0 bis zu ihrem maximalen Werthe E ansteigt, in die Leitung eintritt oder sie verlässt. Diese Ladung beträgt

$$\int_0^E C\,de = CE$$

oder

$$CE = \int_0^{\frac{T}{4}} I \sin \pi Nt\,dt,$$

$$CE = \left[-\frac{I \cos 2\pi Nt}{2\pi N}\right]_0^{\frac{T}{4}},$$

$$CE = -\frac{I}{2\pi N}.$$

In dieser Gleichung treten die maximalen Werthe der Stromstärke und Spannung auf; da jedoch die effektiven Werthe der beiden Grössen in demselben Verhältnis zu einander stehen, so gilt auch:

$$i_k = 2\pi e N C.$$

Hier sind alle Grössen im absoluten Maass gemessen. Drücken wir aber C in Mikrofarad, i_k in Ampère und e in Volt aus, so geht die Formel in folgende Form über:

$$i_k = 2\pi e N C \times 10^{-6} \quad \ldots \ldots \ldots \quad (57)$$

Die Kapacität eines koncentrischen Kabels, dessen innerer Leiter einen Radius von r Centimeter und dessen äusserer Leiter einen innern Radius von R Centimeter besitzt, dessen isolirende Schicht also $R-r$ cm dick ist, kann nach folgender Formel berechnet werden:

$$C = \frac{2{,}413\,\varepsilon\, l \times 10^{-7}}{\log_{10} R - \log_{10} r}\ \text{Mikrofarad}; \quad \ldots\ldots \quad (58)$$

hier bezeichnet l die Länge des Kabels in Centimeter und ε die Dielektricitätskonstante der Isolirung, die je nach der Natur des angewandten Materials zwischen 2,5 und 4,0 schwankt. Nehmen wir 3,3 als Durchschnittswerth für solche Dielektrika an, die hauptsächlich aus schweren Kohlenwasserstoffverbindungen bestehen, und drücken wir die Länge in Kilometer aus, so lautet die Formel:

$$C = \frac{0{,}08\, l}{\log_{10} \frac{R}{r}}\ \text{Mikrofarad.} \quad \ldots\ldots \quad (59)$$

Die Kapacität oberirdischer Leitungen kann nach der von Steinmetz angegebenen Formel[1])

$$C = \frac{1{,}11\, l \times 10^{-6}}{4 \log \text{nat} \left(\frac{d}{r}\right)}$$

berechnet werden; hier bezeichnet l die Länge der Leitung, r den Radius des Drahtes und d die Entfernung der beiden Leiter in Centimeter. Bequemer für den Gebrauch ist die Formel

$$C = \frac{0{,}012\, l}{\log_{10} \left(\frac{d}{r}\right)}, \quad \ldots\ldots \quad (60)$$

wo C die Kapacität in Mikrofarad, l die Entfernung der Uebertragung in Kilometer und der Nenner den Brigg'schen Logarithmus des Verhältnisses zwischen Entfernung und Radius der Drähte bedeutet.

Der Einfluss der Kapacität auf den Generator und Motor lässt sich auch in ähnlicher Weise graphisch darstellen, wie wir es für die Selbstinduktion durchgeführt haben. Es ist nur zu bemerken,

---

[1]) Elektrotechnische Zeitschrift 1893, S. 476.

dass der **Ladungsstrom** gegen die elektromotorische Kraft, die ihn hervorruft, um 90^0 **voraneilt.** Wir wollen an einem Beispiel zeigen, wie die Kapacität auf den **Betrieb** einer Kraftübertragungsanlage einwirkt. Zu diesem Zweck wählen wir **eine ziemlich** lange unterirdische Leitung, die mit einer hohen Spannung betrieben wird, **weil** der Einfluss der Kapacität bei kurzen Entfernungen und mittlern Spannungen zu wenig hervortritt. Die beiden Maschinen mögen durch ein koncentrisches Kabel von 16 km Länge verbunden sein, und die effektive Spannung im Kabel betrage 10000 V. An den Anker des Motors soll eine Energie von 500 Kilowatt übertragen werden. Der gesammte Widerstand der Leitung sei gleich 10 Ohm; die Leiter hätten alsdann einen Querschnitt von 55 qmm. Die Dicke der Isolation betrage 10 mm; dann wäre die Kapacität der gesammten Leitung, die über die ganze Strecke vertheilt ist, ungefähr gleich 3,2 Mikrofarad. Um die genaue Vertheilung der Ladung zu bestimmen, hätten wir eine sehr verwickelte Rechnung auszuführen, denn die Ladung hängt von dem Spannungsunterschied der beiden Leiter ab, der in Folge des Leitungswiderstandes längs des Kabels veränderlich ist. Diese Aenderungen sind jedoch im Verhältnis zu dem gesammten Spannungsunterschied sehr klein, wie sich aus folgender Betrachtung ergiebt. Die gesammte Energie, die übertragen wird, ist 500 Kilowatt bei 10000 V. Wäre keine Phasenverschiebung und keine Kapacität vorhanden, so hätten wir eine Stromstärke von 50 A, und der gesammte Spannungsverlust in der Leitung betrüge 500 V oder 5 % der Gesammtspannung. Dies trifft in Wirklichkeit nicht zu; vielmehr haben wir eine gewisse Phasenverschiebung und eine gewisse Kapacität anzunehmen; der Strom, der vom Generator in die Leitung geschickt wird, ist daher grösser als 50 A, und zwar um einen Betrag, den wir annähernd in folgender Weise abschätzen können.

Ist nämlich die Periodenzahl gleich 50, so folgt aus Formel (57), dass ein Kondensator von 3,2 Mikrofarad Kapacität bei einer Spannung von 10000 V zu seiner Ladung einen Strom von 10 A bedarf. Ein so schwacher Strom, der in der Phase gegen den Arbeitsstrom um ein Viertel der Periode verschoben ist, übt auf die gesammte Stromstärke keinen grossen Einfluss aus. Ebenso kommt die Selbstinduktion nicht sehr in Frage, wie aus den oben mitgetheilten Gründen hervorgeht. Jedenfalls kommen wir der Wahrheit sehr nahe, wenn wir annehmen, dass die gesammte Stromstärke des Kabels nicht mehr als 60 A beträgt. Alsdann haben wir in der Leitung einen Spannungsabfall von 600 V oder 6 % der Gesammtspannung. Dächten wir uns die ganze Kapacität an dem Anfang des Kabels in der Nähe des Generators angehäuft, so würden wir den Spannungsverlust in Folge des Widerstandes der Leitung offenbar unterschätzen, während wir ihn anderseits überschätzten, wenn wir uns die ganze Kapacität an dem Ende des Kabels angebracht dächten. Der Fehler wäre freilich in beiden Fällen nur klein. Wir können ihn jedoch noch dadurch verringern, dass wir annehmen, die ganze Kapacität wäre in der Mitte der Leitung koncentrirt, wie es schematisch in Fig. 97 dargestellt ist. Hier bedeutet G den Generator, M den Motor und K einen Kondensator, der eine Kapacität von 3,2 Mikrofarad besitzt, während wir uns die Leitung kapacitätsfrei denken. Zwischen K und M und ebenso zwischen M und G besitzt die Leitung je einen Widerstand von 5 Ohm, zu dem noch auf jeder Seite ein Ankerwiderstand von 2 Ohm hinzuzufügen ist, so dass der gesammte Widerstand auf jeder Seite 7 Ohm beträgt. Die Induktanz des Motors betrage 40 Ohm, die des Generators 60 Ohm.

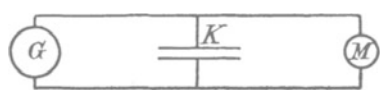


Fig. 97.

Unter diesen Voraussetzungen lässt sich die Aufgabe in folgender Weise darstellen. Wir haben bei K eine effektive Spannung von 10000 V, die einen Strom von der Periodenzahl 50 durch einen Kreis von 7 Ohm Leitungswiderstand und 40 Ohm Induktanz treibt; die Stromstärke ist so bemessen, dass 500 Kilowatt nach M übertragen werden. Diesen Strom muss der Generator G liefern und ausserdem noch den Ladungsstrom für K. Der Generator arbeitet auf einem Stromkreis, dessen Leitungswiderstand 7 Ohm und dessen Induktanz 60 Ohm beträgt; seine elektromotorische Kraft ist so bemessen, dass bei K eine Spannung von 10000 V herrscht. Aus diesen Daten wollen wir auf graphischem Wege die Arbeitsbedingungen der Anlage ableiten. Der Einfachheit halber sehen wir von der Rückwirkung des Ankers ab, die erforderlichen Falls nach den frühern Erläuterungen bestimmt werden kann.

In Fig. 98 möge HH die Energiekurve für 500 Kilowatt bedeuten und Oa_2 den Radius Vektor der resultirenden elektromotorischen Kraft (vergl. auch Fig. 89). Wir konstruiren nun nach den oben mitgetheilten Vorschriften die verschiedenen Radien Vektoren für die elektromotorische Kraft des Motors, die einer Leistungsaufnahme von 500 Kilowatt und einer Betriebsspannung von 10000 V entsprechen. Die Endpunkte dieser Radien liegen auf der punktirten Kurve von Fig. 98. Um den Motor stark überlasten zu können, wählen wir die erregende Kraft so gross, dass wir eine Spannung von 10500 V am Motor erhalten. Dieser Annahme möge der Radius Vektor OE_2 entsprechen. Ziehen wir nun durch E_2 eine Parallele zur Ordinatenachse, die die Energiekurve in B schneidet, und durch B

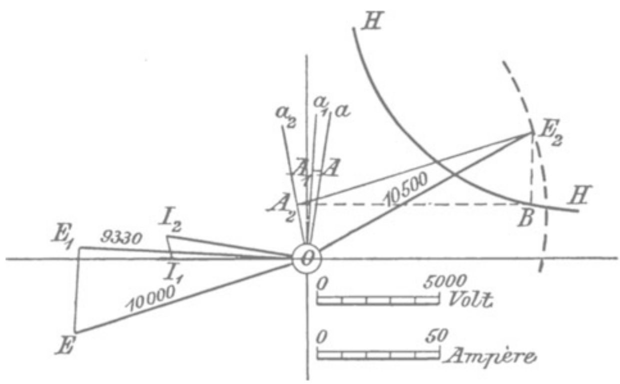


Fig. 98.

eine Parallele zur Abscissenachse, welche den Radius Vektor Oa_2 in A_2 schneidet, so liefert uns A_2E_2 den Werth der Spannung (10000 V) in der Mitte des Kabels; sie wird durch den Radius Vektor OE dargestellt. Die Projektion von OE_2 auf die horizontale Achse beträgt 9100 V; zur Erzeugung der 500 Kilowatt sind also $500000 : 9100 = 55$ A nöthig. Diese Stromstärke, die im Kreise KM herrscht, wird durch OI_1 dargestellt. Um die Stromstärke im Kreise GM zu finden, kombiniren wir OI_1 mit dem Ladungsstrom, der bei der Spannung von 10000 V gleich 10 A ist und in der Phase rechtwinklig auf OE steht. Wir ziehen deshalb I_1I_2 rechtwinklig zu OE und tragen hierauf eine Strecke ab, die 10 A entspricht, dann liefert uns der Radius Vektor OI_2 die Richtung und Grösse der

Stromstärke im Generator; sie beträgt 58 A. Es bleibt uns nun noch übrig, die elektromotorische Kraft des Generators zu bestimmen. Wir ziehen zu diesem Zweck Oa rechtwinklig zu OI_1 und Oa_1 in einem solchen Winkel zu Oa, dass tang aOa_1 gleich dem Verhältnis von Widerstand und Induktanz (in unserm Falle $^7/_{60}$) ist. Ferner tragen wir auf Oa die Strecke OA ab; sie ist gleich der elektromotorischen Kraft von $58 \times 60 = 3480$ V, die zur Ueberwindung der Selbstinduktion nöthig ist. Ziehen wir alsdann durch den Endpunkt A eine Parallele zu OI_2, so erhalten wir den Punkt A_1, und der Radius Vektor OA_1 stellt die Resultante der Spannungen des Generators und der Kabelmitte dar. Wir finden auf diese Weise $OE_1 = 9330$ V als die elektromotorische Kraft, die der Generator besitzen muss, um unter den angenommenen Verhältnissen 500 Kilowatt an den Motor zu übertragen.

Besitzt das Kabel keine Kapacität, so ergiebt eine ähnliche Konstruktion wie die eben angewandte, dass der Generator auf 9900 V erregt werden müsste. Der Einfluss der Kapacität besteht also darin, die Spannung des Generators zu erniedrigen und die Stromstärke zu erhöhen.

Neuntes Kapitel.

Nachtheile der synchronen Wechselstrommotoren. — Vorzüge der asynchronen Wechselstrommotoren. — Der Baily'sche Motor. — Die Arago'sche Scheibe. — Der Ferraris'sche Motor vom Jahre 1885. — Wirkung eines rotirenden magnetischen Feldes auf eine geschlossene Ankerspule. — Schlüpfung. — Theorie der Drehstrommotoren. — Graphische Darstellung des Drehungsmoments. — Leistung beim Angehen. — Magnetische Streuung. — Erweiterung der Theorie auf wirkliche Motoren. — Leistungsfaktor. — Wirkungsgrad. — Beispiele.

Die Kraftübertragung mittels einphasiger, synchroner Wechselstrommaschinen bietet in der Praxis keine Schwierigkeiten und ist sogar das einfachste und zuverlässigste System, wenn die Energie nur auf weite Entfernungen zu übertragen ist und nicht weiter vertheilt zu werden braucht. Soll jedoch an der Endstation eine grosse Zahl kleinerer Motoren gespeist werden, die ohne äussere Hülfsmittel angehen müssen, so ist ein anderes System vorzuziehen. Denn kleine Wechselstrommaschinen als synchrone Motoren zu benutzen, ist aus zwei Gründen nicht rathsam; einmal ist eine besondere Stromquelle zur Erregung ihrer Feldmagnete nöthig, und zum andern kommen sie nicht von selbst in Gang. Bei mittlern und grossen Maschinen hat dies nichts zu bedeuten. In solchen Fällen verfährt man gewöhnlich folgendermaassen: Die Wechselstrommaschine ist mit ihrer Erregermaschine gekuppelt, die beim Anlassen der erstern mit einer am Orte aufgestellten Akkumulatorenbatterie verbunden wird und als Motor läuft. Die Wechselstrommaschine wird in dieser Weise auf die richtige Umlaufsgeschwindigkeit gebracht und, wenn ihre Periodenzahl mit der des Stromes in den Fernleitungen übereinstimmt, an diese angeschlossen. Den richtigen Augenblick für die Einschaltung erkennt man mit Hülfe eines *Synchronisators;* nach Herstellung der Verbindung kann die Maschine allmählich belastet werden. Die Wechselstrommaschine treibt jetzt ihre eigene Erregermaschine, und diese kann noch dazu benutzt werden, um die Batterie für den weitern Gebrauch wieder zu laden. Alle diese Einrichtungen sind verhältnismässig einfach und billig, wenn man es mit grossen Kräften zu thun hat; bei kleinen Motoren bilden jedoch die Erregermaschine, die Batterie, der Synchronisator und die Einrichtungen, um den Motor allmählich zu belasten, eine umständliche und kostspielige Beigabe, die diese Art der Kraftübertragung wenig vortheilhaft macht.

Besonders in Deutschland und in Amerika richtete sich daher die Aufmerksamkeit der Elektrotechniker bald darauf, ein Kraftübertragungssystem zu finden, das von diesen Nachtheilen frei war. Die verschiedenen zu diesem Zwecke erfundenen asynchronen Motoren zeigen grosse Abweichungen in ihren Einzelheiten, haben jedoch alle das gemeinsam, dass ihr Anker durch ein magnetisches Feld angetrieben wird, das mit mehr oder weniger gleichmässiger Winkelgeschwindigkeit um die Achse rotirt. Derartige Maschinen sollten daher *Drehfeldmotoren* genannt werden; es hat sich jedoch dafür der Name *Drehstrommotoren* eingebürgert, den wir auch beibehalten wollen. Zuweilen findet man sie auch als *Mehrphasenmotoren* bezeichnet, weil zwei, drei oder mehrere Wechselströme von gleicher Periodenzahl, aber von verschiedener Phase zu ihrem Betriebe verwendet werden. Ihr Vorzug vor den gewöhnlichen Wechselstrommaschinen besteht darin, dass sie von selbst angehen und besonderer Erregermaschinen nicht bedürfen.

Im Folgenden wollen wir einen kurzen geschichtlichen Ueberblick über die Erfindung der Drehstrommotoren geben, ohne uns jedoch auf die Streitigkeiten über die Priorität der verschiedenen hierauf bezüglichen Patente einzulassen. Wie so viele andere bedeutende Erfindungen, ist auch die des Drehstrommotors älter, als man gewöhnlich annimmt. Nach den Ermittlungen des Verfassers reicht sie bis ins Jahr 1879 zurück, wo Walter Baily am 28. Juni vor der Physikalischen Gesellschaft in London zeigte, dass man die Erscheinungen des Arago'schen Rotationsmagnetismus mit Hülfe einer Anzahl fester Magnete hervorrufen kann, die auf eine Kupferscheibe wirken. Der Vortrag wurde im Philosophical Magazine (Oktober 1879) mit einigen Figuren veröffentlicht, welche das Princip der Erfindung und die Versuchsanordnung erläutern. Eine Kupferscheibe wird in ihrer Mitte von einer Spitze getragen, sodass sie sich frei drehen kann. Unter der Scheibe befinden sich vier

Elektromagnete, deren senkrechte Achsen gleich weit von der Spitze abstehen und deren obere Polflächen der Kupferscheibe möglichst genähert sind. Es ist zu beachten, dass die Kerne dieser Magnete getheilt waren. Die Ströme zur Erregung je zwei gegenüberliegender Magnete wurden von zwei getrennten Batterien entnommen und mit Hülfe eines Kommutators abwechselnd umgekehrt. Baily erkannte augenscheinlich, dass sich die Umdrehung der Scheibe beschleunigen lässt, wenn man die Polarität der Magnete schneller umkehrt; denn er sagt: „Der Versuch mit den vier Magneten lässt sich sehr vervollkommnen, wenn man sich eines Kommutators bedient, der den Strom mehrmals in der Sekunde umkehrt; die Scheibe rotirt dann mit beträchtlicher Geschwindigkeit". Ebenso hatte er schon gefunden,

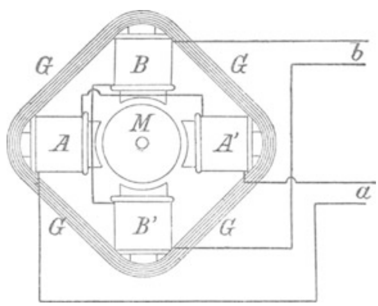


Fig. 99.

dass man die Wirkung des Apparates dadurch erheblich verstärken kann, dass man auch oberhalb der Scheibe Magnete anbringt, d. h. einen geschlossenen magnetischen Kreis herstellt. Auch hatte er in einem der beiden Stromkreise einen Stromwender angebracht, durch den er die Umdrehungsrichtung umkehren konnte. Es sind somit alle wesentlichen Bestandtheile des heutigen Zweiphasenmotors in dem Apparate vereinigt, der vor nunmehr 15 Jahren erfunden wurde, der aber in Vergessenheit gerieth, weil man zu jener Zeit noch nicht an die Möglichkeit dachte, Energie mittels Wechselströmen zu übertragen.

Den nächsten wichtigen Schritt zur Vervollkommnung derartiger Motoren machte Galileo Ferraris, der im Jahre 1885 verschiedene Zweiphasenmotoren konstruirte. Diese Maschinen waren auf der Weltausstellung zu Chicago ausgestellt, und eine davon ist in Fig. 99

abgebildet. Sie besteht aus zwei Paar Elektromagneten AA' und BB', die durch ein Joch G aus weichem Eisen verbunden sind. In dem Hohlraum zwischen den Magnetpolen befindet sich ein Kupfercylinder M, der den Anker bildet. Zu gleichem Zwecke wurden auch massive Eisencylinder mit und ohne Kupfermantel benutzt. Die Beschreibung dieser Motoren wurde erst im Jahre 1888 veröffentlicht, nachdem inzwischen schon zwei andere Patente auf ähnliche Maschinen genommen waren, von denen das eine der Aktien-Gesellschaft Helios in Köln (Mai 1887) und das andere Borel & Paccaud in Genf (Februar 1888) gehörte. Im Mai 1888 erschien dann das ausführliche Tesla'sche Patent über die Kraftübertragung mittels Zweiphasenstroms, dem noch viele andere folgten; unter diesen ist das der Allgemeinen Elektricitäts-Gesellschaft in Berlin und das von Haselwander in Frankfurt a. M. besonders hervorzuheben, die beide im Jahre 1889 herauskamen. Die ersten wirklich brauchbaren Drehstrommotoren stammen von der Allgemeinen Elektricitäts-Gesellschaft und sind von ihrem Chef-Ingenieur v. Dolivo-Dobrowolsky konstruirt.

Die Entstehung eines Drehfeldes ist von Tesla durch Zeichnungen dargestellt worden, von denen einige in Fig. 100 wiedergegeben sind. NS bedeuten die Feldmagnete des Generators, dessen Anker mit zwei getrennten Spulen versehen ist. Das Magnetsystem des Motors besteht aus einem zertheilten Eisenring und ist von vier Spulen umgeben, von denen jedesmal zwei gegenüberliegende zwischen je zwei der vom Generator herführenden Leitungen geschaltet sind. Der Anker des Motors ist in der Figur weggelassen. Wenn der Anker des Generators die in der ersten Figur gezeichnete Lage einnimmt, so wirken die Feldmagnete nur auf die horizontale Spule inducirend. Diese sendet einen Strom durch die rechte und linke Spule des Magnetsystems des Motors, wodurch ein nach N gerichtetes Feld erzeugt wird. Hat der Anker des Generators die in der zweiten Figur angegebene Stellung erreicht, so werden seine beiden Spulen inducirt. In Folge dessen werden sämmtliche Spulen des Motors erregt und erzeugen durch ihr Zusammenwirken ein Feld in der Richtung des geneigten Pfeiles. Erreicht der Anker des Generators die dritte Stellung, so sind nur die obere und die untere Spule des Motorankers in Wirksamkeit und erzeugen ein Feld von horizontaler Richtung u. s. w. Das Feld des Motors rotirt also mit gleicher Geschwindigkeit, wie der Anker des Generators.

Man sieht sofort, dass eine ähnliche Wirkung auch in dem Ferraris'schen Motor (Fig. 99) erzielt wird. Bezeichnen wir mit a und b die beiden Ströme, die die Magnete AA' und BB' erregen, und nehmen wir an, ihre Phasendifferenz betrage 90^0, so wird der Strom a seinen höchsten Werth haben, wenn b Null ist, und umgekehrt. Im ersten Falle verläuft das Feld horizontal durch den Anker; ein Achtel der Periode später haben beide Ströme dieselbe Stärke (a nimmt ab, während b wächst), und das erzeugte Feld wird um 45^0 gegen das frühere geneigt sein. Nach einem weitern Achtel

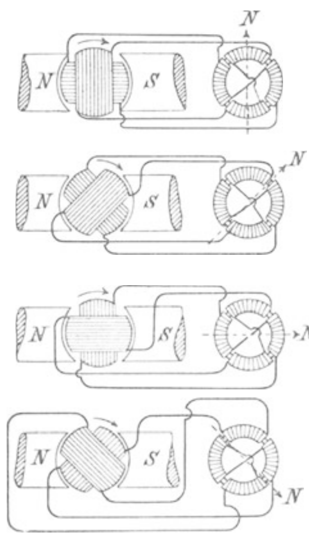


Fig. 100.

der Periode sind nur die Magnete BB' erregt, und das Feld verläuft vertikal u. s. w. Das resultirende Feld rotirt also mit einer Geschwindigkeit, die von der Periodenzahl der zugeführten Ströme abhängt.

Baut man einen Ferraris'schen Motor mit drei Paaren von Feldmagneten und erregt diese in ähnlicher Weise mit drei Wechselströmen, von denen jeder gegen die beiden andern in seiner Phase um 120^0 verschoben ist, so erhält man ebenfalls ein Drehfeld. Dasselbe gilt in ähnlicher Weise für eine beliebige grössere Anzahl von Phasen. Indessen ist es nicht vortheilhaft, mehr als drei Phasen anzuwenden, weil die Vermehrung der Stromkreise zu unbequemen Weiterungen führt; für praktische Zwecke hat man daher nur zwischen zwei oder drei Phasen zu wählen.

Eine Kraftübertragungsanlage mittels Mehrphasenstromes besteht also aus einem oder mehreren Generatoren, die den Strom am Ausgangspunkt der Leitung erzeugen, und aus einem Drehstrommotor an der Endstation; die Leitung selbst besitzt wenigstens drei Drähte, wie wir später zeigen werden. Für den Augenblick wollen wir uns nur auf den Motor beschränken und seine Theorie in ähnlicher Weise ableiten, wie es oben für Gleichstrommaschinen und einphasige Wechselstrommotoren geschehen ist.

Der bekannte Arago'sche Versuch mag als Ausgangspunkt für unsere Betrachtungen dienen. Eine Kupferscheibe ist an einer senkrechten Achse befestigt, die durch ihre Mitte geht. Möglichst nahe über der Scheibe ist eine Magnetnadel angebracht, die sich in nordsüdlicher Richtung einstellt, wenn die Scheibe still steht. Dreht man jedoch die Scheibe in einem beliebigen Sinne, so wird die Nadel in der Richtung der Bewegung abgelenkt und nimmt schliesslich an der Drehung theil, wenn diese hinreichend beschleunigt wird. Diese Erscheinung lässt sich in folgender Weise erklären. Die Magnetnadel erzeugt in ihrer Umgebung ein magnetisches Feld, dessen Kraftlinien zum Theil durch die Scheibe verlaufen und von dieser bei der Drehung geschnitten werden. Hierdurch werden Ströme in der Scheibe inducirt, deren Verlauf ziemlich verwickelt ist. Soviel ist jedoch klar, dass sie in der Nähe der Pole annähernd eine radiale Richtung haben müssen, denn nur dann fliessen sie senkrecht zur Richtung der Bewegung und zu der der Kraftlinien. Sie laufen daher der Nadel ziemlich parallel und beeinflussen diese in ähnlicher Weise, wie bei dem bekannten Oersted'schen Versuche, wo sich ein vom Strome durchflossener Leiter in nordsüdlicher Richtung über oder unter einer Magnetnadel befindet. Diese erfährt in Folge dessen eine Ablenkung, die in eine fortdauernde Drehung übergeht, wenn sie mehr als 90^0 beträgt.

Dieser Versuch lässt sich offenbar auch umkehren, indem wir den Magnet in Drehung versetzen und dadurch auf die Scheibe ein Drehungsmoment ausüben; wir haben alsdann die einfachste Form eines Drehstrommotors, dessen Anker durch die Kupferscheibe gebildet wird. Eine solche Anordnung hat jedoch nur theoretisches Interesse, da sie die Wirkung der Drehstrommotoren erklärt; für praktische Zwecke ist sie nicht brauchbar. Denn wir müssen hier mechanische Energie aufwenden, um den Magnet zu drehen, könnten diese alsdann aber auch unmittelbar benutzen und brauchten sie nicht vorher durch den Motor zu schicken. Dieser bekommt erst dann praktischen Werth, wenn an Ort und Stelle keine mechanische Energie nöthig ist. Wir haben daher die Maschine so umzuändern, dass der rotirende Magnet durch eine Vorrichtung ersetzt wird, der man die Energie in der Form eines elektrischen Stromes zuführt. Dies geschieht auch wirklich bei den Drehfeldern, wie sie von Ferraris, Tesla u. s. w. eingeführt worden sind.

Wenn wir einen permanenten Magnet rotiren lassen, so ist die Stärke und die Vertheilung des Feldes für alle Lagen des Magnetstabes unveränderlich; um dieselbe Wirkung mittels eines elektrisch erzeugten Feldes zu erreichen, sind folgende Bedingungen zu erfüllen: 1. Die Stärke und die Vertheilung des Feldes müssten von der Lage im Raum unabhängig sein; 2. die Umdrehungsgeschwindigkeit des Feldes müsste konstant sein. Man sieht leicht, dass der Ferraris'sche Motor (Fig. 99) diesen Anforderungen nicht genügt, und dass dies überhaupt in der Praxis bei keinem Motor der Fall sein kann. Besitzt der Motor eine bestimmte Anzahl von Feldmagnetpolen, so wird die Bewegung des resultirenden Feldes mehr oder weniger sprungweise erfolgen; ebenso erfährt die Stärke und die Vertheilung des Feldes ziemlich bedeutende Veränderungen. Selbst wenn wir überhaupt keine Feldmagnete anwenden, so wird die Feldstärke wegen der stets beschränkten Zahl der erregenden Spulen niemals konstant sein. Freilich werden die Unterschiede in dem Werthe der Feldstärke, wie wir später sehen werden, durch die Rückwirkung des Ankers abgeschwächt und sind daher nicht so schädlich, wie es auf den ersten Blick scheint.

Für den vorliegenden Zweck können wir jedoch von diesen Einzelheiten absehen; es kommt vielmehr darauf an zu untersuchen, ob ein Feld, wie es praktisch zu erzeugen ist, ein Drehungsmoment auf den Anker ausübt. Augenscheinlich wird die Bewegung des Feldes um so gleichmässiger erfolgen, je mehr Ströme von verschiedener Phase in Anwendung kommen. Wir wollen daher den ungünstigsten Fall untersuchen, wo das Drehfeld durch zwei Ströme erzeugt wird, die in der Phase um ein Viertel der Periode von einander abweichen. Sehen wir von der Rückwirkung des Ankers ab, so ist in diesem Falle das Verhältnis zwischen maximaler und minimaler Feldstärke wie $1 : \sqrt{2} = 1 : 1{,}41$, während es bei einem Dreiphasenmotor gleich $\sqrt{3}/2 : 1 = 1 : 1{,}16$ sein würde. Um der Betrachtung einen einfachen Fall zu Grunde zu legen, wählen wir einen Gramme'schen Ring, dessen Wicklung, wie Fig. 101 zeigt, aus zwei Paar Spulen A und B besteht. Die Ströme, die im Innern des Ringes ein rotirendes Feld erzeugen, werden durch die Drähte aa und bb zugeführt. Der Anker, der innerhalb des Ringes angebracht ist, besteht aus einem cylindrischen Kern von Eisenplatten und ist an seiner Aussenseite mit Drähten bewickelt, von denen je zwei, die um ein Viertel des Umfangs von einander entfernt liegen, eine in sich geschlossene Windung bilden. Durch diese Anordnung erhält man augenscheinlich die stärkste inducirende Wirkung.

Die Vertheilung der Feldstärke wird für die verschiedenen Phasen einer Periode durch Fig. 101, I bis IX, dargestellt. Der Einfachheit halber ist der innere Umfang des Ringes in eine Gerade ausgestreckt; der Induktionsfluss, der auf jedes Centimeter dieses Umfanges kommt, wird alsdann durch die Ordinaten der gebrochenen Linien dargestellt. Wir greifen eine Ankerwindung heraus, die in jeder Figur in derselben Stellung gezeichnet ist. Die Richtung des Stromes, der in ihr durch die Bewegung des Feldes inducirt wird, geben in üblicher Weise Punkte und Kreuze an. Das Vektordiagramm an der linken Seite jeder Figur stellt die Phase der beiden Ströme dar. So ist die Stromstärke in Fig. I in Spule A Null, während sie in Spule B ihren höchsten Werth besitzt. Das durch B erzeugte Feld geht an den Punkten 2 und 6 durch Null und ändert sein Vorzeichen. Da nun die Windung von den Theilen des Feldes geschnitten wird, die zwischen den Punkten 1 und 3 liegen, und in diesem Gebiete die eine Hälfte des Feldes positiv, die andere aber negativ ist, so ist die gesammte Stärke des von der Spule eingeschlossenen Feldes Null. Wie man aus Fig. II ersieht, hat die Stärke desselben Feldes einen Augenblick später einen positiven Werth; da die Spule nach dem Lenz'schen Gesetze dieser Veränderung entgegenwirken muss, so haben wir als Richtung des Stromes in Fig. I die durch Punkt und Kreuz bezeichnete anzunehmen. In Folge der Wechselwirkung zwischen diesem Strom und dem Felde in 1 und 3 greift an jeden Leiter eine Kraft ein, die ihn nach rechts treibt, wie die kleinen Pfeile andeuten.

In der Lage II, die auf die Lage I nach einem Sechszehntel einer vollen Periode folgt, wirkt noch immer auf beide Drähte eine nach rechts gerichtete Kraft; sie ist jedoch bei Punkt 1 grösser, weil das Feld hier stärker als bei Punkt 3 ist. In der Lage III fliesst der Strom noch immer in derselben Richtung, aber eine nach rechts gerichtete Kraft wirkt nur auf den Draht bei Punkt 1, da die Feldstärke bei Punkt 3 jetzt Null ist. Auch in der Lage IV ist die Strom-

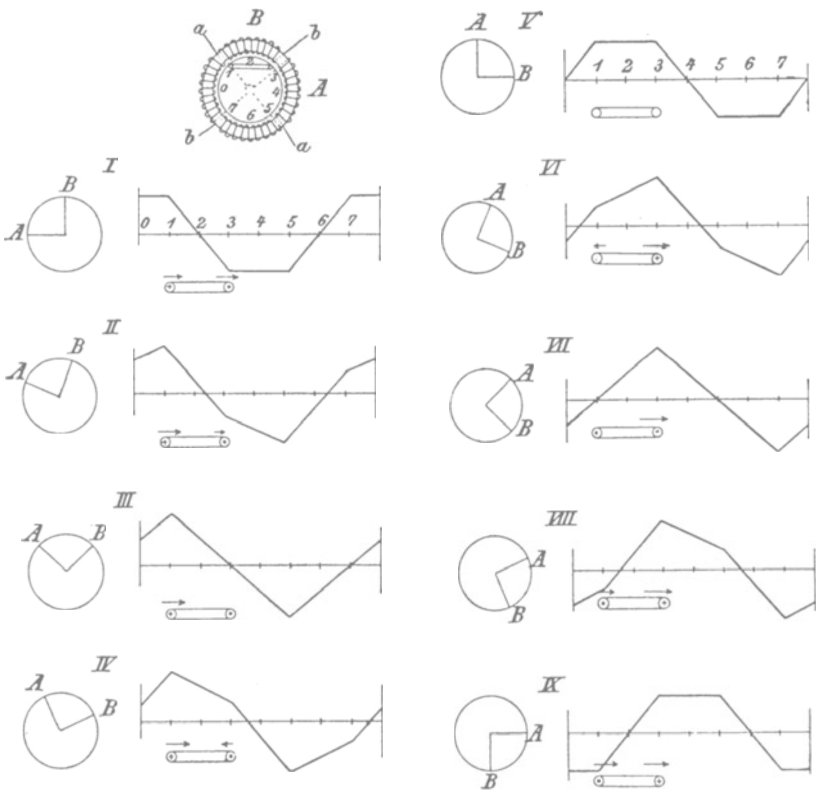


Fig. 101.

richtung noch unverändert, aber während die Kraft auf den Draht bei Punkt 1 noch in demselben Sinne wirkt, hat die auf den andern Draht wirkende Kraft schon ihre Richtung geändert und wirkt der ersten entgegen. In der Lage V ist die Stromstärke Null, es wirkt also auch keine Kraft. Für die Lage VI ist die Stromrichtung umgekehrt; da jedoch auch die umgekehrte Feldrichtung bei Punkt 3 überwiegt, so bleibt die Kraftrichtung unverändert. Dies findet auch bei weiterm Fortschreiten des Feldes statt; die Kraft sucht die Windung stets im Sinne des Uhrzeigers zu drehen und lässt sie der Bewegung des Feldes folgen. Was wir hier für eine Ankerwindung bewiesen haben, gilt augenscheinlich auch für alle übrigen. Die Gesammtwirkung besteht also darin, dass dem Anker ein kräftiges, im Sinne des Uhrzeigers wirkendes Drehungsmoment ertheilt wird.

Diese allgemeine Darstellung giebt eine genügende Erklärung dafür, wie das Drehungsmoment bei dem Anker eines Drehstrommotors zu Stande kommt; für eine genaue Bestimmung desselben reicht sie jedoch nicht aus, da sie einen sehr wichtigen Faktor, nämlich die Rückwirkung des Ankers, unberücksichtigt lässt. Die gebrochenen Linien, welche den Verlauf der Feldstärke in Fig. 102 darstellen, entsprechen natürlich nur dann der Wirklichkeit, wenn die Ströme in den Spulen A und B allein das Feld erzeugten. Wir sahen jedoch, dass auch in den Ankerdrähten Ströme verlaufen, die nothwendiger Weise die Vertheilung und die gesammte Stärke des Feldes beeinflussen müssen. Wenn diese Wirkung auch eigentlich nur eine sekundäre ist, so darf sie doch nicht unberücksichtigt bleiben; jede Theorie der Drehstrommotoren, welche die Rückwirkung des Ankers vernachlässigt, muss zu falschen Schlüssen führen.

Wollten wir die Untersuchung über den Einfluss der Ankerströme ganz allgemein, d. h. für ein Feld von beliebiger Vertheilung und Geschwindigkeit, durchführen, so würden wir zu sehr verwickelten mathematischen Ausdrücken gelangen, die für praktische Zwecke keinen Werth hätten. Wir begnügen uns daher mit einer angenäherten und einfachen Lösung der Aufgabe, wobei wir von der Annahme ausgehen, dass die in Fig. 101 dargestellte gebrochene Linie durch eine Sinuslinie zu ersetzen ist, die mit konstanter Geschwindigkeit fortschreitet. Diese Voraussetzung entspricht ziemlich den Thatsachen. Denn einmal können die scharfen Ecken der gebrochenen Linie nicht auftreten, wenn sich zwischen dem Magnetring und dem Anker ein Luftzwischenraum befindet. Sodann muss, da rings um den Anker herum geschlossene Windungen angebracht sind, jede Veränderung der Feldstärke (abgesehen von der Veränderung, die von dem gleichmässigen Fortschreiten des Feldes herrührt) sofort in den Ankerdrähten Ströme erzeugen, die dieser Aenderung entgegenwirken; in Folge dessen werden die Maxima ausgeglichen und die scharfen Ecken abgerundet. Dass die Ankerströme wirklich diese Wirkung hervorbringen, zeigt sich in der Praxis schon darin, dass Zweiphasenmotoren ebenso gut wie Dreiphasenmotoren arbeiten; und doch müsste der Unterschied zwischen höchster und niedrigster Feldstärke bei den erstern 42 % und bei letztern 16 % betragen.

Um also die Untersuchung der Betriebsbedingungen von Drehstrommotoren mathematisch möglichst zu vereinfachen, nehmen wir an, dass sich die Induktion im Luftzwischenraum zwischen den Feldmagneten und dem Anker nach dem Sinusgesetz ändert. Ob diese Induktion allein von den Feldmagneten herrührt, oder ob die Ankerströme dabei mitwirken, wollen wir zunächst dahingestellt sein lassen; vorläufig genügt es zu wissen, dass ein solches Feld wirklich existirt, wenn der Motor im Gange ist und mit einer Geschwindigkeit umläuft, die der Periodenzahl des zugeführten Stromes entspricht. Hätten wir vier Spulen, wie in Fig. 101, und eine Periodenzahl von 50, so würde dies einem zweipoligen Felde entsprechen, das 50 Umdrehungen in der Sekunde oder 3000 in der Minute machte. Die Geschwindigkeit des Ankers muss natürlich kleiner sein, da er bei seiner Bewegung Widerstände zu überwinden hat. Würde aber wirklich der Fall eintreten, dass der Anker und das Feld genau dieselbe Umdrehungsgeschwindigkeit hätten, so bliebe auch der Induktionsfluss in jeder Spule oder zwischen zwei beliebigen Drähten auf dem Anker unverändert; es könnte also auch keine elektromotorische Kraft und kein Strom in den Ankerdrähten zu Stande kommen. Ohne Strom ist aber auch keine Zugkraft denkbar, und der Anker könnte daher nicht in Umdrehung versetzt werden. Eine Veränderung des Induktionsflusses innerhalb der Ankerwindungen ist daher unbedingt nöthig und bedingt ihrerseits einen Unterschied zwischen der Umdrehungsgeschwindigkeit des Ankers und der des Feldes. Man nennt diesen Unterschied die *Schlüpfung* des Ankers. Bei den guten Maschinen beträgt die Ankerschlüpfung bei voller Belastung etwa 4 % und erreicht selten 10 % der Umdrehungszahl; gute Drehstrommotoren verhalten sich demnach hinsichtlich der Konstanz ihrer Geschwindigkeit bei verschiedener Belastung etwa wie Gleichstrommotoren mit Nebenschlusswicklung.

Wir erwähnten oben, dass der in Fig. 101 dargestellte Anker bei einer Periodenzahl von 50 mit 3000 Umdrehungen in der Minute umlaufen würde, wenn seine Bewegung keinen Widerstand fände; hat er Arbeit zu leisten, so würde er vielleicht um 4 % langsamer laufen. Dies ist eine ausserordentlich hohe Geschwindigkeit für alle Motoren mit Ausnahme der ganz kleinen; sie lässt sich jedoch leicht dadurch verringern, dass wir die Zahl der Spulen auf dem Magnetringe vergrössern und dem entsprechend ihre Breite verkürzen. Verwenden wir z. B. statt 4 Spulen, von denen jede 90^0 umfasst, 8 Spulen von je 45^0 und verbinden diese so unter einander, dass sie zwei Drehfelder erzeugen, so geht die Geschwindigkeit auf die Hälfte des früheren Betrages zurück. Durch weitere Vermehrung der Spulen lässt sich auch die Umdrehungszahl noch mehr vermindern; so erhalten wir für die Periodenzahl von 50 mit 12 Spulen

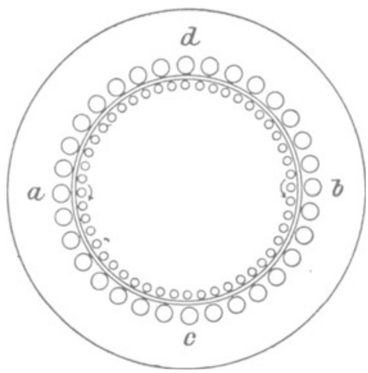


Fig. 102.

1000 Umdrehungen und mit 16 Spulen 750 Umdrehungen. Der Einfachheit halber beginnen wir jedoch mit einer zweipoligen Maschine, die nur ein Drehfeld besitzt, und verschieben die Untersuchung der vielpoligen Maschinen mit mehreren Feldern solange, bis wir den einfachern Fall erledigt haben.

Eine Maschine mit nur einem Drehfeld ist in Fig. 102 dargestellt. Das Feldmagnetsystem besteht aus einem feststehenden Hohlcylinder, der aus isolirten Eisenplatten besteht und an seinem innern Umfang Bohrungen zur Aufnahme der Drähte besitzt. Der Anker ist ein Vollcylinder, der auch aus Eisenplatten zusammengesetzt und an seiner Mantelfläche mit Bohrungen für die Drähte versehen ist. Die Benutzung versenkter Stäbe ist nicht unbedingt nöthig, hat jedoch zwei grosse Vorzüge. Einmal liegt die Wicklung fester und geschützter, sodann ist der magnetische Widerstand des Luftzwischenraums sehr klein; gerade dieser letzte Umstand ist, wie wir später sehen werden, von grosser Wichtigkeit, wenn der Unterschied zwischen der wirklichen und scheinbaren Leistung der Maschine nicht zu gross sein soll. Die Ankerstäbe sind so zu einzelnen Windungen untereinander verbunden, dass jede den Cylinder voll umspannt, oder sie sind sämmtlich durch ringförmige Leiter an den beiden Stirnflächen des Cylinders in der Form eines Trillerkäfigs kurz geschlossen. Beide Verbindungsarten thun gleich gute Dienste; da jedoch die letztere einfacher auszuführen ist, wollen wir sie für den vorliegenden Fall wählen. Die Verbindungsstücke sollen sehr stark dimensionirt sein, sodass ihr Widerstand gegen den der Stäbe zu vernachlässigen ist. Das Potential beider Verbindungsringe bleibt dann stets Null, während der in jedem Leiter fliessende Strom gleich dem Quotienten aus der in ihm wirkenden elektromotorischen Kraft und seinem Widerstande ist. Die elektromotorische Kraft, die hier in Rechnung zu setzen ist, rührt nicht allein davon her, dass die Ankerstäbe die Kraftlinien des rotirenden Feldes schneiden, sondern es wirken hierbei auch die Ankerströme und die Selbstinduktion mit.

Nehmen wir jetzt an, der Motor leiste Arbeit. Das primäre Feld, das durch den zugeführten Strom erzeugt wird, mache N_1 Umdrehungen in der Sekunde, während der Anker des Motors mit N_2 Umdrehungen folgen möge. Die Schlüpfung ist alsdann

$$S = \frac{N_1 - N_2}{N_1} \quad \text{. . . . .} \quad (61)$$

Dreht sich das Feld im Sinne des Uhrzeigers, so folgt der Anker in demselben Sinne mit geringerer Geschwindigkeit. Vom Felde aus gesehen, wird sich der Anker im entgegengesetzten Sinne des Uhrzeigers mit der Geschwindigkeit

$$N = N_1 - N_2$$

zu bewegen scheinen. Um die elektromagnetischen Vorgänge im Anker zu erklären, dürfen wir daher das Feld als fest annehmen, während wir uns den Anker durch einen Riemen in entgegengesetzter Richtung gedreht denken. Die effektive tangentiale Zugkraft, die der Riemen alsdann auf den Anker überträgt, ist unter diesen Umständen genau gleich der tangentialen Kraft, welche in Wirklichkeit vom Anker bei seiner richtigen Geschwindigkeit an den Riemen abgegeben wird. Um das vom Motor ausgeübte Drehungsmoment zu berechnen, können wir daher annehmen, er würde mit bedeutend geringerer Geschwindigkeit und in umgekehrter Richtung als Generator betrieben, und die ganze ihm zugeführte Energie würde zur Erhitzung der Ankerstäbe verbraucht. Diese Anschauungsweise erleichtert die Untersuchung ungemein. Denn kennen wir erst das Drehungsmoment, das nöthig ist, um die Maschine langsam als Generator rückwärts zu treiben, so lässt sich daraus leicht die Leistung berechnen, die sie mit ihrer vorwärts gerichteten, eigentlichen Geschwindigkeit als Motor liefert.

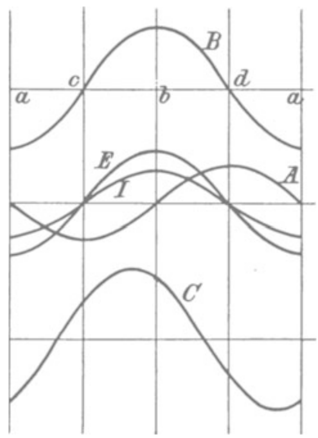


Fig. 103.

In Fig. 103 möge die Horizontale *acbd* den Zwischenraum zwischen dem Anker und dem Magnetsystem darstellen, der in eine Gerade ausgebreitet ist; die Ordinaten der Sinuslinie *B* entsprechen der Induktion in diesem Raume, durch den sich die Ankerstäbe mit einer Geschwindigkeit von *N* Umdrehungen in der Sekunde bewegen. Wir geben zunächst über die Entstehung dieses Feldes weiter nichts an, als dass es von sämmtlichen in der Maschine fliessenden Strömen erzeugt wird. Jedoch sehen wir vorläufig von jeder Streuung ab und machen die Annahme, dass längs des schmalen Raumes zwischen den Anker- und den Feldmagnetdrähten keine Kraftlinien verlaufen, dass diese also sämmtlich für die Induktion im Anker ausgenutzt werden und radial gerichtet sind, und zwar nach aussen im Gebiete *dac* und nach innen im Gebiete *cbd*. Da sich der Anker umgekehrt, wie der

Uhrzeiger dreht, so bewegt sich jeder Stab von a über c nach b u. s. w. Die elektromotorische Kraft wird daher in allen Stäben, die links vom vertikalen Durchmesser (Fig. 102) liegen, nach unten und in allen rechts von ihm gelegenen Stäben nach oben gerichtet sein. Die Kurve E (Fig. 103) möge den Verlauf der elektromotorischen Kraft darstellen; da keine magnetische Streuung stattfindet, so besitzt die Stromstärke gleiche Phase mit der elektromotorischen Kraft und lässt sich daher durch die Kurve I veranschaulichen. Wir haben nun zu beachten, dass diese Kurve in Wirklichkeit zwei verschiedene Bedeutungen hat. Einmal stellt sie die augenblicklichen Werthe der Stromstärke in jedem Leiter während seiner Umdrehung von links nach rechts dar, sodann veranschaulicht sie die dauernde Vertheilung des Stromes in sämmtlichen Leitern, vorausgesetzt, dass sie so zahlreich sind, dass man für die Vertheilung eine Kurve und keine gebrochene Gerade erhält, die aus kurzen vertikalen und horizontalen Stücken zusammengesetzt ist.

Es entsteht jetzt die Frage, welche magnetisirende Kraft von diesen Strömen ausgeübt wird, die durch die Kurve I zusammengefasst werden, oder wie das magnetische Feld vertheilt ist, das allein durch ihre Wirkung zu Stande käme. Die positiven Ordinaten von I bedeuten Ströme, die in Fig. 103 aufwärts oder nach dem Beschauer zu fliessen, negative Ordinaten dagegen Ströme von umgekehrter Richtung. Die letztern suchen einen magnetischen Wirbel in der Richtung des Uhrzeigers zu erzeugen, die erstern einen solchen im entgegengesetzten Sinne. Betrachten wir den Leiter, der sich gerade bei b befindet, so wird sein Strom ein Feld hervorzurufen suchen, dessen Kraftlinien oberhalb des Leiters radial nach innen und unterhalb desselben radial nach aussen fliessen. In ähnlicher Weise sucht der Leiter, der sich bei a befindet, ein Feld zu erzeugen, das über ihm radial nach innen und unter ihm radial nach aussen verläuft. Man sieht leicht, dass durch das Zusammenwirken sämmtlicher Ströme, die durch die Kurve I (Fig. 103) dargestellt werden, ein Feld erzeugt wird, das seinerseits durch die Kurve A veranschaulicht wird. Diese muss augenscheinlich durch die Punkte a und b gehen, da die magnetisirenden Kräfte zu beiden Seiten von a und b gleich und entgegengesetzt sind, und eine Sinuskurve sein, wie sich leicht auf folgende Weise zeigen lässt. i möge der Strom sein, der bei b in einem Streifen der Ankeroberfläche von 1 cm Breite fliesst, und r sei der Radius des Ankers; alsdann fliesst ein Strom von der Stärke $i \cos \alpha$ in einem Streifen von gleicher Breite, der um den Winkel α von b entfernt ist. Für einen Streifen von unendlich kleiner Breite, der durch den Winkel $d\alpha$ eingeschlossen wird, erhalten wir demnach die Stromstärke

$$di = ir \cos \alpha \, d\alpha.$$

Die magnetisirende Kraft aller Leiter, die zwischen b und dem durch den Winkel α bestimmten Punkte liegen, ist daher in Ampèrewindungen

$$\int_o^\alpha di = ir \sin \alpha.$$

Da die Leiter auf der andern Seite von b in demselben Sinne wirken, so wird an dem betrachteten Punkte die magnetisirende Kraft $2ir \sin \alpha$ wirken, wo i die oben angegebene Bedeutung hat. Für die geringen Kraftliniendichten, mit denen wir hier zu rechnen haben, ist die Permeabilität des Eisens als konstant anzunehmen. die Feldstärke ist also den Ankerwindungen proportional und kann durch eine Sinuskurve dargestellt werden.

Nun gingen wir von der Annahme aus, dass nur das Feld, das die Kurve B darstellt, im Motor wirklich existire; dieser Voraussetzung widerstreitet unsere jetzige Folgerung, dass die im Anker inducirten Ströme für sich allein ein zweites Feld hervorrufen können, das durch die Kurve A dargestellt wird. Wir müssen daher annehmen, dass andere Ursachen das Entstehen dieses zweiten Feldes verhindern, und haben dieselben in den Strömen zu suchen, die die Feldmagnete umfliessen. Diese müssen ein Feld von solcher Anordnung und solcher Stärke erzeugen, dass sich an einer Stelle zwei Komponenten einführen lassen, von denen die eine gleiche Stärke, aber entgegengesetzte Richtung mit A hat, die andere gleich B ist. B muss daher die Resultante des primären Feldes und des Ankerfeldes A sein. Die Kurve C stellt dieses primäre Feld dar, das allein der Wirkung der zugeführten Ströme zuzuschreiben ist. Das resultirende Feld bleibt hinter diesem primären Felde um einen Winkel zurück, der kleiner als ein Viertel der Periode ist.

Die Betriebsverhältnisse des Motors, die wir hier an der Hand von Kurven abgeleitet haben, lassen sich auch durch ein Vektordiagramm darstellen. In Fig. 104 stelle OB die maximale Feldstärke im Luftzwischenraum dar (d. h. die Kraftliniendichte bei a und b in

Fig. 102) und $O I_a$ die gesammte erregende Kraft (in Ampèrewindungen), welche von den Ankerströmen in den Leitern rechts und links von der Vertikalen herrührt; alsdann bedeutet OA im gleichen Maassstab wie OB die maximale Kraftliniendichte, welche diese Ströme erzeugen. Wir wollen hier nicht ermitteln, in welchem Verhältnis OI_a und OA stehen, sondern hierauf unten zurückkommen. Jetzt ist nur unsere frühere Voraussetzung zu beachten, nach der

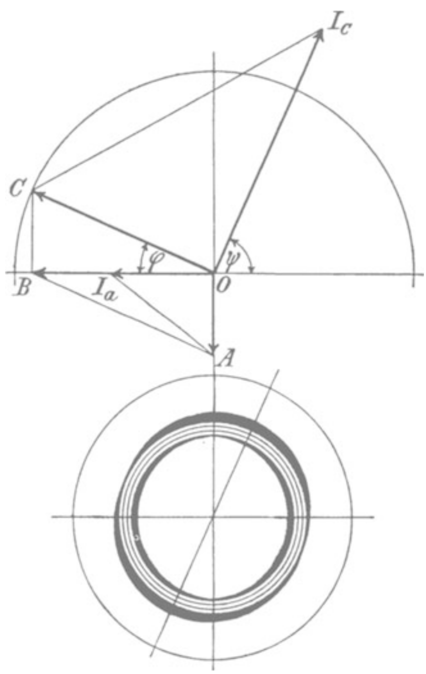


Fig. 104.

keine magnetische Streuung in der Maschine stattfindet; in Folge dessen steht OA senkrecht auf OI_a und OB, und das Verhältnis zwischen OI_a und OA ist konstant. Errichten wir im Endpunkt von OB ein Loth und machen dies gleich OA, so erhalten wir in der Strecke OC die grösste Stärke des primären Feldes. Um die gesammte erregende Kraft der Feldmagnete zu finden, ziehen wir von C aus eine Gerade, die mit OC denselben Winkel bildet, wie AI_a mit OA, und die die Senkrechte OI_c, welche in O auf OC errichtet wurde, im Punkte I_c schneidet. Die Strecke OI_c stellt dann die gesammte erregende Kraft (in Ampèrewindungen) dar, die für die Feldmagnete aufzuwenden ist. Die untere Zeichnung giebt einen Schnitt durch die Maschine; doch anstatt wie oben die Leiter durch kleine Kreise anzugeben, sind die Ströme des Ankers und der Feldmagnete durch spitz zulaufende Linien dargestellt, deren Dicke die Stromdichte in jedem der beiden Theile veranschaulichen soll.

Es wird hier am Platze sein, im Allgemeinen den Gang der Untersuchung anzugeben. Man findet in Lehrbüchern und Zeitschriften viele Abhandlungen über die Theorie der Drehstrommotoren, und es wäre leicht gewesen, eine solche Darstellung im Auszuge mitzutheilen und es dem Leser zu überlassen, daraus für den praktischen Gebrauch die nöthigen Folgerungen zu ziehen. Einem Ingenieur oder Studirenden der Elektrotechnik, für die dies Buch bestimmt sein soll, wäre hiermit jedoch wenig gedient. Wir haben deshalb bei unserer Darstellung auf die mathematische Kürze und Eleganz verzichtet, und eine weitläufigere Behandlungsweise vorgezogen, die den Vortheil bietet, dass sie für den Praktiker verständlicher ist, weil sie stets den Zusammenhang zwischen den physikalischen Grössen und den sie darstellenden Formeln durchblicken lässt.

Unser Ziel ist es, die Betriebsbedingungen eines Motors aufzufinden, der mit zwei oder drei Wechselströmen von gegebener Spannung gespeist wird. Dazu müssen uns einerseits die Stärke und die Phasenverschiebung der zugeführten Ströme, anderseits die Geschwindigkeit, die Leistung und der Wirkungsgrad des Motors bekannt sein. Um die Untersuchung möglichst einfach und übersichtlich zu gestalten, gehen wir folgendermaassen vor. Wir nehmen zunächst an, in dem betrachteten Motor träten nur Verluste auf, die von dem Ohm'schen Leitungswiderstande der Ankerstäbe herrühren; ferner soll keine magnetische Streuung stattfinden. Ein derartiger Motor lässt zwei Betriebsarten zu. Einmal können wir den Strom in den Speiseleitungen konstant halten, haben es also mit einem konstanten primären Felde zu thun, oder wir arbeiten bei konstanter Spannung des zugeführten Stromes, was ein konstantes resultirendes Feld zur Folge hat. Hierauf gehen wir zu einem wirklichen Motor über, wie er in der Praxis benutzt wird. In einem solchen tritt ausser verschiedenen anderen Verlusten eine magnetische Streuung auf. Führt man deshalb einem derartigen Motor Ströme konstanter

Spannung zu, so ist die resultirende Feldstärke nicht mehr konstant, sondern nimmt mit zunehmender Belastung ab. Die Betriebsbedingungen eines solchen Motors liegen daher ungefähr in der Mitte zwischen denen, die für die beiden zuerst behandelten idealen Fälle gelten.

Bei der Behandlung des idealen Motors, dem ein Strom von konstanter Stärke zugeführt wird, gehen wir auf unsere ursprüngliche Vorstellung zurück, nach der der Anker durch einen Riemen rückwärts getrieben wird, während das primäre Feld konstant und fest im Raum ist. Es muss alsdann die dem Riemen zugeführte tangentiale Kraft dem Produkt aus OB und OI_a proportional sein. Da letztere wieder OA proportional ist, so bildet $\overline{OA} \times \overline{OB}$ oder der Inhalt des Dreiecks OCB ein Maass für das Drehungsmoment. Die elektromotorische Kraft und die Stromstärke jedes Ankerleiters, sowie die gesammte Anzahl der Ampèrewindungen (OI_a) des Ankers sind sämmtlich der Umdrehungsgeschwindigkeit und der Stärke des resultirenden Feldes proportional. Wir haben demnach

$$\overline{OI_a} = KN \times \overline{OB},$$

wo K eine Konstante bedeutet, die von der Konstruktion der Maschine abhängt.

Was wird nun eintreten, wenn wir bei konstanter erregender Kraft (OI_c) des Feldes die Riemengeschwindigkeit vergrössern oder verringern, sodass sich N in weiten Grenzen ändert? Für kleine Werthe von N wird die Maschine als Motor mit einer nur etwas kleinern Geschwindigkeit laufen, als einer synchronen Bewegung der beiden Felder entspricht. Ist N gross, aber kleiner als N_1, so würde die Maschine als Motor langsam laufen; ist $N = N_1$, so entspricht dies dem Angehen des Motors. Gerade dieser letzte Fall ist von grosser Bedeutung für die Konstruktion solcher Maschinen, deren Hauptvorzug den gewöhnlichen synchronen Wechselstrommotoren gegenüber darin besteht, unter Belastung anzugehen.

Wenn die Felderregung konstant gehalten wird, so behält das primäre Feld stets seine Stärke bei, ändert jedoch seine Richtung gegen OB, wenn die Geschwindigkeit N erhöht wird. Jeder Lage von C auf dem Kreise um O, der das primäre Feld darstellt, entspricht demnach eine bestimmte Geschwindigkeit N und ein bestimmtes Drehungsmoment. Wir wollen im Folgenden die Beziehung zwischen diesen beiden Grössen ermitteln.

Aus der oben aufgestellten Gleichung ergiebt sich, dass die Geschwindigkeit dem Verhältnis von $O\,I_a$ zu $O\,B$ proportional ist. Nun ist $O\,I_a$ proportional $O\,A$ und dieses wieder gleich BC, sodass die trigonometrische Tangente des Winkels φ ein Maass für die Geschwindigkeit wird. Es ist hierbei nicht zu vergessen, dass die Maschine, von deren Geschwindigkeit wir sprechen, als Generator bei kurz geschlossenem Ankerkreise durch Riemen angetrieben wird. Eine niedrige Geschwindigkeit in diesem Sinne entspricht einer geringen Schlüpfung und einer hohen Geschwindigkeit des Motors, und umgekehrt. Die Beziehung zwischen Geschwindigkeit und Drehungsmoment ist jetzt leicht aus der Zeichnung ersichtlich. Erstere ist der Tangente des Winkels φ, letzteres dem Inhalt des Dreiecks $O\,C\,B$ proportional. Ist die Geschwindigkeit Null (bei synchronem Gang des Motors), so ist auch der Inhalt des Dreiecks Null, der Motor liefert also kein Drehungsmoment. Für eine sehr niedrige Geschwindigkeit (bei geringer Schlüpfung des Ankers) ist das Dreieck schmal und das Drehungsmoment klein. Vergrössern wir die Geschwindigkeit (mit andern Worten die Schlüpfung des Ankers), so wächst das Drehungsmoment bis zu seinem höchsten Werthe, den es für $\varphi = 45^0$ erreicht. Eine weitere Erhöhung der Geschwindigkeit verringert den Inhalt des Dreiecks und damit das Drehungsmoment, und zwar um so mehr, je stärker die Geschwindigkeit ansteigt. Damit der Motor einen stabilen Gang einhält, muss daher die Schlüpfung so gross sein, dass die zugehörigen Werthe von φ zwischen 0 und 45^0 liegen. Wäre sie grösser, so würde eine geringe Zunahme der Belastung den Motor in einen Zustand bringen, in dem das von ihm ausgeübte Drehungsmoment kleiner als zuvor ist; der Motor würde daher stehen bleiben. Ist anderseits die Schlüpfung so gering, dass φ beträchtlich kleiner als 45^0 ist, so geräth der Motor bei Zunahme der Belastung in einen Zustand, in dem auch das Drehungsmoment grösser ist; er wird sich also ohne Gefahr in die Höhe arbeiten. Kann der Motor daher überhaupt die Belastung durchziehen, so wird er sich von selbst so einreguliren, dass $\varphi < 45^0$ wird; beim Anlaufen ist er jedoch nothwendigerweise in einem unstabilen Zustande, da $\varphi > 45^0$ ist. Der Motor nimmt demnach sehr schnell eine solche Geschwindigkeit an, dass die Bewegung des Feldes und die des Ankers nahezu synchron werden, während das Drehungsmoment anfangs bis zu einem Maximum für $\varphi = 45^0$ ansteigt und dann auf den Werth abfällt, der der Belastung entspricht.

Fig. 105 zeigt den allgemeinen Charakter der Kurve, die die Beziehung zwischen Geschwindigkeit und Drehungsmoment darstellt, ihr genauer Verlauf hängt natürlich von den konstruktiven Einzelheiten der Maschine ab. Zwei Linien sind für die Geschwindigkeit eingetragen; die obere stellt die Geschwindigkeit N der Maschine dar, wenn sie als Generator mittels eines Riemens rückwärts getrieben wird, und zählt von rechts nach links; die untere entspricht der Geschwindigkeit N_2 des Motors und ist von links nach rechts zu zählen. Um ein Angehen des Motors zu ermöglichen ($N_2 = 0$), muss die Belastung so gewählt sein, dass die Gerade ganz unter der Kurve liegt; die Betriebsbedingungen des Motors sind dann durch den Punkt P gegeben.

Von grossem Einfluss auf die Gestalt dieser Kurve ist der Widerstand der Ankerleiter. Um dies zu zeigen, machen wir die

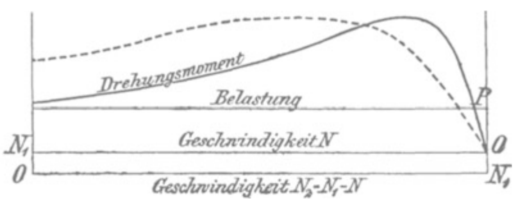


Fig. 105.

Annahme, wir könnten auf irgend eine Weise plötzlich den Widerstand der Ankerleiter der Maschine verdoppeln, auf die sich Fig. 104 bezieht. Bei gleicher Geschwindigkeit und bei gleicher Stärke des resultirenden Feldes würde daher die erregende Kraft der Ankerleiter nur die Hälfte ihres frühern Betrages erreichen, und somit auch das Feld des Ankers nur die halbe Stärke des frühern besitzen. Um dies wieder auszugleichen, wäre die Geschwindigkeit zu verdoppeln, sodass die Tangente des Winkels φ der doppelten Geschwindigkeit, wie vorher, entspräche. In der Zeichnung (Fig. 105) würden wir daher die Abscissen überall zu verdoppeln haben. Hierdurch entsteht die in Fig. 105 punktirt gezeichnete Kurve, die sofort zeigt, dass durch Verdoppelung des Ankerwiderstandes auch das Drehungsmoment beim Angehen verdoppelt wird. Zu gleicher Zeit ist der Punkt P nach links verschoben, was eine stärkere Schlüpfung und eine grössere Verschiedenheit der Geschwindigkeiten beim Leerlauf und bei voller Belastung zur Folge hat. Das Maximum des Drehungsmoments ist unverändert geblieben, folglich auch die Ueberlastung, die der Motor verträgt; er kann jedoch bei stärkerer Belastung angehen. Anderseits hat man zu bedenken, dass ein hoher Ankerwiderstand wegen der damit verbundenen Energieverluste und Ueberhitzung schädlich wirkt. Um diese Nachtheile zu umgehen und doch den Vortheil des Angehens bei starker Belastung beizubehalten, werden die Anker der grossen Motoren zuweilen mit Windungen bewickelt, die von einander isolirt und nicht in sich geschlossen sind, sondern zu Kontaktringen führen. An diese Ringe sind mittels Bürsten äussere Widerstände angeschlossen, die nur beim Anlassen des Motors benutzt und kurz geschlossen werden, wenn der Motor die richtige Geschwindigkeit erreicht hat. Ist die Wicklung des Ankers in drei um 120^0 gegen einander verschobenen Kreisen angeordnet, die ein fast genau sinusförmiges resultirendes Feld (Kurve A in Fig. 103) liefern, so sind hierzu drei Kontaktringe nöthig.

Dieselbe Wirkung erzielen Siemens & Halske ohne Verwendung von Widerständen dadurch, dass sie beim Angehen des Motors in jedem Kreise der Ankerwicklung einen Theil der Windungen gegen die übrigen schalten und erst bei voller Geschwindigkeit alle Windungen jedes Kreises zusammenwirken lassen[1]). Hierzu sind keine Bürsten, sondern nur einige Kontakte auf der Ankerachse nöthig, auf denen Schlussstücke entweder von Hand oder durch Wirkung der Centrifugalkraft automatisch verschoben werden.

Wir haben uns bisher nur ganz allgemein mit der gestellten Aufgabe beschäftigt. Um die Untersuchung für praktische Anwendungen nutzbar zu machen, ist jetzt die genaue numerische Beziehung zwischen erregender Kraft und Feldstärke, sowie zwischen Feldstärke und Drehungsmoment festzustellen. Die letztere behandeln wir zuerst. B möge, wie zuvor, die maximale resultirende Feldstärke im Luftzwischenraum bedeuten; die Ankerleiter sollen an den Stirnflächen des Ankers durch dicke Kupferringe kurz geschlossen sein, deren Widerstand zu vernachlässigen ist. Die Zahl der Ankerleiter sei ν, der Widerstand eines jeden gleich ρ (in Ohm). Die Feldstärke an einer beliebigen Stelle der Ankeroberfläche sei $B \sin \alpha$; dabei wird α von einem Radius aus gerechnet, der auf der Richtung, wo die maximale Kraftliniendichte B herrscht, senkrecht steht. Ist r der Radius des Ankers in Centimeter und v seine Umfangs-

---

[1]) Görges, El. Zschr. 1894, S. 644.

geschwindigkeit, so ist

$$v = 2\pi r N,$$

und für die elektromotorische Kraft an einer Stelle, die um den Winkel α von dem Punkt mit der elektromotorischen Kraft Null entfernt liegt, erhalten wir

$$e = v\, l\, B \sin\alpha \times 10^{-8} \text{ Volt},$$

wenn l die Länge des Ankers in Centimeter bedeutet. Da im Ganzen ν Leiter auf eine Länge von $2\pi r$ Centimeter kommen, so sind auf jedes Centimeter $\frac{\nu}{2\pi r}$ Leiter und auf ein Element des Umfangs von der Länge $r\,d\alpha$ demnach $\frac{\nu\,d\alpha}{2\pi}$ Leiter zu rechnen. Der Widerstand der Leiter, die auf ein Element des Ankerumfangs fallen, ist daher $\frac{2\pi\varrho}{\nu\,d\alpha}$; es kommt also auf ein solches Element ein Strom von der Stärke

$$di = \frac{\nu\, v\, l\, B \sin\alpha \times 10^{-8}}{2\pi\varrho}\, d\alpha \text{ Ampère.}$$

Führen wir statt v seinen oben abgeleiteten Werth ein und drücken wir di in absoluten Einheiten aus, so wird

$$di = \frac{\nu\, r\, N\, l\, B \sin\alpha \times 10^{-9}}{\varrho}\, d\alpha.$$

Da $B \sin\alpha$ die Feldstärke an dem betrachteten Punkte ist, so ist die tangentiale Kraft, die von dieser unendlich kleinen Gruppe von Leitern herrührt, deren Länge l ist,

$$dP = \frac{\nu\, r\, N\, l^2\, B^2 \sin^2\alpha \times 10^{-9}}{\varrho}\, d\alpha \text{ Dynen.}$$

Integriren wir diesen Ausdruck zwischen den Grenzen $\alpha = 0$ und $\alpha = \pi$, so erhalten wir die tangentiale Kraft, die von einer Ankerhälfte ausgeübt wird. Da nun

$$\int_0^{\pi} \sin^2\alpha\, d\alpha = \frac{\pi}{2}$$

ist, und da beide Ankerhälften im gleichen Sinne wirken, so ergiebt sich als gesammte tangentiale Kraft des Ankers

$$P = \frac{\pi\, \nu\, r\, N\, l^2\, B^2 \times 10^{-9}}{\varrho} \text{ Dynen.}$$

Die höchste Stromstärke in einem Leiter, wenn er sich im Gebiete höchster Feldstärke befindet, ist nun

$$J = \frac{2\pi r l N B \times 10^{-8}}{\varrho} \text{ Ampère.}$$

Führen wir diesen Ausdruck in obige Gleichung ein, so erhalten wir

$$P = \frac{1}{2} \nu l B J \times 10^{-1} \text{ Dynen}$$

oder

$$P = \frac{1}{2 \times 9{,}81} \nu l B J \times 10^{-6} \text{ kg}^* \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (62)$$

Es dürfte von Interesse sein, diesen Ausdruck mit dem analogen für Gleichstrommotoren zu vergleichen. Unter Beibehaltung derselben Bezeichnungen erhalten wir in diesem Falle für die tangentiale Kraft

$$P = \frac{2\nu}{\pi} l B j \times 10^{-1} \text{ Dynen,}$$

wo j die Stärke des Gleichstroms bedeutet. Um beide Maschinen unter entsprechenden Verhältnissen zu vergleichen, müssen wir für beide dieselbe Induktion B und dieselbe Zahl von Ankerdrähten von gleichem Widerstande annehmen. Wir haben ferner die Stromstärke so zu reguliren, dass sie in beiden Maschinen dieselbe Erwärmung erzeugt. Dies trifft augenscheinlich zu, wenn die Gleichung

$$J = j\sqrt{2}$$

erfüllt ist. Wir finden daher folgende Beziehung zwischen beiden Maschinen:

Tangentiale Zugkraft des	
Drehstrommotors	Gleichstrommotors
$\sqrt{\frac{1}{2}}\, \nu l B j \times 10^{-1}$	$\frac{2}{\pi} \nu l B j \times 10^{-1}$.

Verwendet man also gleich viel Kupfer auf dem Anker, so zieht der Drehstrommotor etwa 11 % mehr als der Gleichstrommotor. Hierzu kommt, dass sich der Drehstrommotor einfacher und solider herstellen lässt.

Der Ankerstrom sucht ein Feld A zu erzeugen, das auf dem primären Felde B rechtwinklig steht. Um die erregende Kraft des Feldes zu bestimmen, müssen wir den Strom integriren, der durch die eine Hälfte der Ankerdrähte fliesst. An der Stelle, wo B den höchsten Werth besitzt, herrscht die Stromstärke J, und es kommt dort auf jedes Centimeter des Umfangs ein Strom von der Stärke $\frac{\nu J}{2\pi r}$. Diese Stromdichte ändert sich mit der Lage des betrachteten Punktes auf dem Umfang des Ankercylinders und beträgt $\frac{\nu J}{2\pi r} \sin \alpha$ in einem Punkte, der von der Stelle, wo kein Strom in den Ankerdrähten fliesst, um den Winkel α entfernt liegt. Betrachten wir eine elementare Gruppe dieser Drähte, die innerhalb des Winkels $d\alpha$ liegen, so fliesst durch sie ein Strom von der Stärke $\frac{\nu J}{2\pi} \sin \alpha \, d\alpha$. Integriren wir diesen Ausdruck über den halben Anker von $\alpha = 0$ bis $\alpha = \pi$, so erhalten wir als erregende Kraft der Ankerströme, die das Feld A zu erzeugen suchen:

$$X_a = \frac{\nu J}{\pi} \text{ Ampèrewindungen.} \quad \ldots \ldots \quad (63)$$

Bezeichnen wir mit δ die radiale Tiefe des Zwischenraumes zwischen Anker und Magnetring in Centimeter, so würde eine erregende Kraft von dieser Stärke, die allein wirkte, ein Feld erzeugen, dessen Kraftliniendichte für das Quadratcentimeter durch die Formel

$$M = \frac{X_a}{1{,}6\,\delta} \quad \ldots \ldots \ldots \quad (64)$$

darzustellen wäre.

Die gesammte Leistung A, die vom Anker des Drehstrommotors geliefert wird, ergiebt sich durch Multiplikation der Umfangsgeschwindigkeit $2\pi r N_2$ mit P; wir erhalten demnach

$$A = \nu \pi r N_2 l B J \times 10^{-1} \frac{\text{Centimeter-Dynen}}{\text{Sekunde}}$$

oder

$$A = \nu \pi r N_2 l B J \times 10^{-8} \text{ Watt.}$$

Da J dem resultirenden Felde proportional ist, so muss die Leistung des Motors augenscheinlich dem Quadrat der maximalen Induktion im Zwischenraum zwischen Anker und Magnetring proportional sein. Setzen wir im obigen Ausdruck für A der Einfachheit halber

$$F = 2 r l B,$$

bezeichnen also mit F den gesammten Induktionsfluss zwischen Anker und Magnetring, der dem gesammten nutzbaren Felde bei den Gleichstrommaschinen entspricht, so wird

$$A = {}^1/_2\, \nu\, \pi\, N_2\, F\, J \times 10^{-8} \text{ Watt.}$$

Der Ausdruck $\pi N_2 F$ bezeichnet hier die maximale elektromotorische Kraft, welche in einem Ankerleiter erzeugt wird, wenn er sich mit einer Geschwindigkeit von N_2 Umdrehungen in der Sekunde in einem feststehenden Felde F bewegt. Bezeichnen wir diese elektromotorische Kraft mit E, so wird

$$A = {}^1/_2\, \nu\, E\, J \text{ Watt.}$$

Sind e und i die entsprechenden effektiven Werthe der Spannung und der Stromstärke in einem Ankerleiter, so ergiebt sich der folgende einfache Ausdruck für die Leistung eines Drehstromankers mit zweipoligem Magnetring und mit in sich geschlossenen Ankerdrähten:

$$A = \nu\, e\, i \text{ Watt} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad (65)$$

Hier bedeutet ν die Zahl der Drähte rings um den Anker und i die effektive Stromstärke in einem Ankerleiter, welcher das Feld F bei $N = N_1 - N_2$ vollen Umdrehungen in der Sekunde durchschneidet; diese Stromstärke ist nach Seite 246 durch die Gleichung

$$i = \frac{\pi}{\sqrt{2}} \frac{NF}{\varrho} \times 10^{-8} \text{ Ampère} \quad . \; . \; . \; . \; . \quad (66)$$

gegeben, wo ϱ den Widerstand eines Leiters darstellt. Ferner ist e die effektive elektromotorische Kraft in einem Leiter, der das Feld F bei N_2 Umdrehungen in der Sekunde durchschneidet; diese Grösse ist durch die Gleichung

$$e = \frac{\pi}{\sqrt{2}} N_2 F \times 10^{-8} \text{ Volt} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \quad (67)$$

darzustellen.

Für die Energie, die im Anker in Form von Wärme verbraucht wird, erhalten wir

$$a = \nu\, \varrho\, i^2 = \frac{A}{e}\, i \varrho,$$

oder da

$$\frac{i\varrho}{e} = \frac{N}{N_2},$$

$$a = A \frac{N}{N_2}.$$

Damit daher diese Energie nicht zu gross wird, muss N im Verhältnis zu N_2 klein sein. Die Schlüpfung des Ankers ist

$$S = \frac{N}{N_1},$$

und da sich unter den gewöhnlichen Bedingungen N_1 und N_2 nicht sehr von einander unterscheiden, so können wir auch

$$a = SA$$

setzen. Die Grösse der Schlüpfung ist somit ein direktes Maass für den Effektverlust, der als Wärme im Anker verzehrt wird. Hoher Wirkungsgrad und grosses Drehungsmoment beim Angehen sind daher Bedingungen, die einander in gewisser Weise widersprechen. Um mit hohem Wirkungsgrad zu arbeiten, muss der Anker niedrigen Widerstand besitzen; in Folge dessen wird die Schlüpfung klein. Die Kurve des Drehungsmoments steigt daher steil an und endigt dicht über der Abscissenachse; der Anker kann also beim Angehen nur wenig Arbeit leisten, verträgt jedoch, wenn er erst einmal im Gange ist, eine beträchtliche Ueberlastung. Bei starker Schlüpfung, die bei hohem Ankerwiderstande stattfindet, kommt das Ende der Kurve für das Drehungsmoment höher zu liegen, sodass der Motor beim Angehen eine starke Belastung durchziehen kann. Auf der andern Seite arbeitet er jedoch mit geringerm Wirkungsgrad und erfährt bei verschiedenen Belastungen bedeutende Aenderungen in seiner Geschwindigkeit. Man lässt für die Schlüpfung des Ankers Werthe zu, die zwischen 0,02 und 0,05 liegen.

Es bleibt jetzt noch übrig, den Einfluss des resultirenden Drehfeldes B auf die Spulen der Feldmagnete zu bestimmen. Der Einfachheit halber nehmen wir wieder an, das Magnetsystem sei durch einen Gramme'schen Ring gebildet (Fig. 106), dessen gegenüberliegende Spulen hintereinander geschaltet und von demselben Strom durchflossen werden. Wir beschränken die Untersuchung auf eine der vier Spulen und wählen dazu die Spule A. Anstatt der Betrachtung ein Feld, das sich mit einer Geschwindigkeit von N_1 Umdrehungen in der Sekunde im Sinne des Uhrzeigers dreht, zu Grunde zu legen, nehmen wir an, es sei fest im Raume, während sich die Spule mit derselben Geschwindigkeit im entgegengesetzten Sinne dreht. Dann werden die innern Theile der Gramme'schen Wicklung von den Kraftlinien des Feldes geschnitten, sodass in ihnen elektromotorische Kräfte entstehen.

In Fig. 106 stelle OB das resultirende Feld dar; dann herrscht bei a die Feldstärke $B \cos(\varphi + \alpha)$, während die elektromotorische Kraft, die in einer Drahtwindung bei a herrscht,

$$2 \pi r N_1 l B \cos(\varphi + \alpha) \times 10^{-8} \text{ Volt}$$

beträgt. φ ist der Winkel, den ein nach der Mitte der Spule gezogener Radius in dem betrachteten Augenblicke mit der Richtung der maximalen Induktion B bildet. Um den augenblicklichen Werth der elektromotorischen Kraft nicht nur für eine Windung, sondern für die ganze Spule zu bestimmen, müssen wir erstere zwischen den Grenzen $\alpha = \frac{\pi}{4}$ und $\alpha = -\frac{\pi}{4}$ integriren. Bezeichnet ν' die

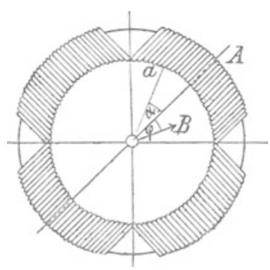


Fig. 106.

Anzahl der Windungen einer Spule, so ist die Zahl der Windungen, welche auf ein Element $r\,d\alpha$ des Ringumfanges kommen, gleich $\frac{2\nu'}{\pi}\,d\alpha$; für die gesammte elektromotorische Kraft erhalten wir daher

$$e = 4 r N_1 l \nu' B \times 10^{-8} \int_{-\frac{\pi}{4}}^{\frac{\pi}{4}} \cos(\varphi + \alpha)\,d\alpha$$

oder

$$e = 4 \sqrt{2}\, r N_1 l \nu' B \cos \varphi \times 10^{-8} \text{ Volt.}$$

Für die elektromotorische Kraft der beiden gegenüberliegenden hintereinander geschalteten Spulen ist der doppelte Betrag einzuführen. Sie besitzt ihren höchsten Werth für $\varphi = 0^0$, wenn der Durchmesser, der die Mitten beider Spulen verbindet, mit der Richtung der stärksten Induktion zusammenfällt; sie ist Null, wenn $\varphi = 90^0$ ist. Die elektromotorische Kraft ändert sich daher in jedem Spulensatze wie eine Sinusfunktion. Ihr höchster Werth ist

$$E = 4\sqrt{2}\, N_1\, F \nu' \times 10^{-8} \text{ Volt,}$$

wo $F = 2rlB$ ist und ν' die Anzahl der Windungen auf einem Viertel des Ringes bedeutet. F stellt natürlich das gesammte resultirende Feld dar, das von dem Magnetring in den Anker übertritt. Wäre die Wicklung auf einen schmalen Streifen zusammengedrängt, statt sich über zwei Viertel des Ringes auszubreiten, so würde

$$E = 2\pi\, N_1\, F \nu' \times 10^{-8} \text{ Volt}$$

werden. Man sieht, dass dieser Ausdruck dem oben gewonnenen ähnlich ist; er unterscheidet sich nur durch den Koefficienten, der hier 2π ist, während er oben $4\sqrt{2}$ war. Der Unterschied zwischen den beiden Koefficienten rührt von der Ausbreitung der Wicklung über zwei Viertel des Ringes her.

Da sich die effektive zur maximalen Spannung wie $1 : \sqrt{2}$ verhält, so finden wir die effektive elektromotorische Kraft, die in jeder der beiden Feldwicklungen durch das resultirende Drehfeld inducirt wird, zu

$$e = 4\, N_1\, F \nu' \times 10^{-8} \text{ Volt,} \quad \ldots \ldots \quad (68)$$

wo ν' wieder die Zahl der Windungen auf einem Viertel des Magnetringes bedeutet. Die Spannung e hat eine mehr oder weniger entgegengesetzte Richtung, wie der zugeführte Strom; diese elektromotorische Gegenkraft, oder richtiger gesagt, ihre Komponente, die in gleicher Phase mit dem Strome ist, bewirkt, dass letzterer Energie an den Motor abgiebt. Die gesammte Leistung, die von den Strömen in beiden Spulen geliefert wird, ist

$$A = 8\, i\, N_1\, F \nu' \cos\psi \times 10^{-8} \text{ Watt,}$$

wo i die effektive Stromstärke in jedem der beiden Leitungskreise und ψ den Winkel der Phasenverschiebung zwischen dem Leitungsstrom und der elektromotorischen Gegenkraft bedeutet. Die Phasenverschiebung ist natürlich für beide Stromkreise gleich und wird in Fig. 104 durch den Winkel ψ dargestellt. Da φ kleiner als 45^0 sein muss, wenn die Betriebsbedingungen für den Motor stabil sein sollen, so muss ψ grösser als 45^0 sein. Die Leistung des Motors beträgt daher in Wirklichkeit etwas weniger als $\frac{1}{\sqrt{2}}$ oder 70 % der scheinbar von den beiden Leitungskreisen gelieferten. Wenn $\varphi = 45^0$ wirklich der Grenzwerth für praktisch herstellbare Maschinen wäre, so würde dies bedeuten, dass die ganze Anlage, nämlich Generator, Leitung und Motor, wenigstens um 50 % grösser ausgeführt werden müsste, als der wirklich übertragenen Energie entspricht. Man hat jedoch zu bedenken, dass sich diese Betrachtungen nicht auf die Konstruktion und den Betrieb von wirklichen Maschinen beziehen. Hier liegen offenbar die Verhältnisse in einer Hinsicht ungünstiger, da noch gewisse Verluste und die magnetische Streuung zu berücksichtigen sind. Dagegen gestaltet sich der Betrieb der Maschinen in der Praxis anderseits bedeutend besser. Denn bei unserer Betrachtung setzten wir voraus, dass das primäre Feld konstant sei, und dass demnach auch die zugeführten Ströme konstant sind. Der Betrieb war so gedacht, dass der Motor mit den Leitungen, die den konstanten Strom zuführen, hintereinandergeschaltet ist; unter solchen Umständen kann die Maschine in der That keine befriedigenden Ergebnisse liefern. Im wirklichen Betriebe sind aber die Leitungen und der Motor parallel geschaltet, und zwischen den Leitungen herrscht eine konstante Spannung; unter solchen Umständen verhält sich die Maschine, wie wir später zeigen werden, bedeutend besser.

Bevor wir jedoch hierzu übergehen, müssen wir noch für den mit konstantem Strom betriebenen Motor die Beziehungen zwischen der aufgewandten erregenden Kraft der Feldmagnete und der resultirenden Induktion B untersuchen. Da letztere die Resultante von A und C ist und ihre Lage zu diesen aus dem Diagramm der Fig. 104 bekannt ist, so lässt sich die Aufgabe auch dadurch lösen, dass wir die Beziehung zwischen der erregenden Kraft der Feldmagnete und dem primären Feld unter der Voraussetzung ableiten, dass weiter keine Ströme wirksam sind. Führen wir daher einen Anker ohne Leiter ein, so würde die Felderregung, die der Strecke OJ_c in Fig. 104 entspricht, die Induktion OC liefern; es würden also an der Stelle, wo die Induktion ihren höchsten Werth hat, auf jedes Quadratcentimeter des Luftzwischenraums C Kraftlinien kommen. Ist δ die radiale Tiefe des Luftzwischenraums, und vernachlässigen wir die erregende Kraft, die dazu nöthig ist, die Kraftlinien durch das Eisen der Feldmagnete und des Ankers zu treiben, so wird

$$X_c = 1{,}6\,\delta\,C$$

die erregende Kraft in Ampèrewindungen darstellen, die zur Erzeugung der maximalen Induktion C erforderlich ist. Die in Wirklichkeit erzeugte Induktion ist kleiner, nämlich gleich B. Weil jedoch die erregende Kraft des Ankers zum Theil der des Feldes entgegengesetzt ist, so muss die letztere so beschaffen sein, dass sie die resultirende Induktion B liefern kann. Da wir wissen, dass jede der vier Spulen ν' Windungen besitzt, so lässt sich jetzt die Stromstärke in jeder von ihnen bestimmen. In dem Augenblick, wo der Strom in einem Kreise Null ist, muss durch den andern ein Strom von der Stärke $\frac{X_c}{\nu'}$ (Ampère) fliessen. Ein Achtel der Periode später, wenn die Ströme in allen Spulen gleiche Stärke haben, ist diese gleich $\frac{X_c}{2\,\nu'}$, und je zwei benachbarte Spulen wirken im gleichen Sinne. Nun wäre die maximale Stromstärke, die dem Werthe $\frac{X_c}{2\,\nu'}$ entspricht, gleich $\frac{X_c}{\nu'\sqrt{2}}$, während sich für die vorher betrachtete Phase die maximale Stromstärke zu $\frac{X_c}{\nu'}$ ergab. Der Unterschied, den diese beiden Methoden ergeben, rührt davon her, dass das Feld bei Verwendung von Zweiphasenströmen nicht konstant ist. Es wurde bereits gezeigt, dass dies Fluktuiren der Feldstärke durch die Ströme verringert wird, die in der geschlossenen Ankerwicklung fliessen. Diese Ströme haben weiter keine andere Wirkung, als dass sie die Verluste etwas vergrössern, die vom Ohm'schen Widerstande des Ankers herrühren. Um die wirkliche Stärke der Ströme zu finden, die zur Erzeugung der Induktion B nöthig ist, haben wir das Mittel aus den beiden oben gefundenen Werthen zu nehmen und finden für die effektive Stromstärke in jeder der beiden Spulen ungefähr

$$i = 0{,}6\,\frac{X_c}{\nu'}\ \text{Ampère}\ \ldots\ldots \quad (69)$$

Derselbe Werth ergiebt sich für i, wenn wir die Energie, die dem Felde zugeführt wird, gleich der Summe der vom Anker abgegebenen und der im Ankerwiderstande verzehrten Energie setzen. Dies ergiebt

$$2\,e\,i\cos\psi = A\left(1 + \frac{N}{N_2}\right)$$

oder

$$i = \frac{A\left(1 + \frac{N}{N_2}\right)}{2\,e \cos\psi} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (70)$$

Hier ist ψ aus dem Vektordiagramm (Fig. 104) zu entnehmen, und die Buchstaben e und i beziehen sich auf die Feldmagnete und nicht auf den Anker.

Wir betrachten nun den idealen Motor, bei dem keine magnetische Streuung und keine sonstigen Verluste (abgesehen von der Erwärmung des Ankerwiderstandes) auftreten sollen, unter der Be-

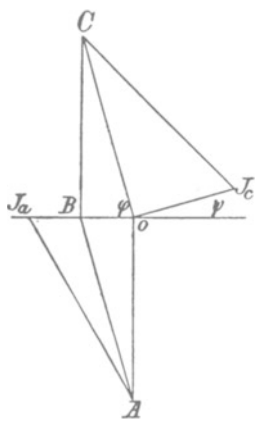


Fig. 107.

dingung, dass der zugeführte Strom konstante Spannung besitzt. Das Vektordiagramm eines solchen Motors ist sehr einfach.

Denn die elektromotorische Gegenkraft, die von dem resultirenden Drehfelde in den Spulen des Magnetringes hervorgerufen wird, ist in diesem Falle gleich der Spannung in den Zuleitungen. Da diese konstant ist, so muss auch das resultirende Feld B für alle Belastungen konstant sein. In Fig. 107 möge OB, wie oben, das resultirende Feld darstellen und OA das Feld, das unter dem Einfluss der erregenden Kraft OJ_a von der Rückwirkung des Ankers herrührt. Alsdann ist OC das primäre Feld, das durch die Wirkung der Spulen auf dem Magnetring erzeugt wird; die entsprechende erregende Kraft ist OJ_c, weil $\measuredangle\, OAJ_a = \measuredangle\, OCJ_c$ sein muss. Da ferner die erregende Kraft des Ankers der Geschwindigkeit $N = N_1 - N_2$ proportional ist, so kann die Strecke OA als Maass für die Geschwindigkeit gelten. Das Drehungsmoment ist dem Produkt aus der Stärke des resultirenden Feldes und aus dem Ankerstrom proportional; da erstere konstant und letztere der Strecke $OA = BC$ proportional ist, so kann man BC als Maass für das Drehungsmoment ansehen. Diese Strecke stellt daher sowohl die Geschwindigkeit, als das Drehungsmoment dar, sodass beide Grössen einander proportional zu setzen sind. Das Drehungsmoment wird daher einfach durch eine geneigte Gerade (Fig. 108) dargestellt, die für $N = 0$ oder $N_1 = N_2$ durch Null hindurchgeht und für $N = N_1$ oder $N_2 = 0$ ihren höchsten Punkt erreicht.

Fig. 108.

Fig. 108 enthält ausserdem eine Kurve, die die Leistung des Ankers als Funktion der Geschwindigkeit darstellt. Die Ordinaten dieser Kurve sind dem Produkt $(N_1 - N_2) N_2$ proportional; sie ist demnach eine Parabel, die die Abscissenachse im Punkte $N_2 = 0$, wo der Motor angeht, und im Punkte $N_2 = N_1$, wo der Motor synchron läuft, schneidet. Die Leistung, die den Feldmagneten durch die Fernleitungen zugeführt wird, stellt eine Gerade dar; der Stromstärke entspricht eine Linie, die im grössten Theil ihres Verlaufs gerade, am unteren Ende jedoch schwach gekrümmt ist. Der Strom besitzt während des synchronen Ganges des Motors, wo das primäre Feld gleich dem resultirenden ist, seine geringste Stärke und bleibt in der Phase um 90^0 zurück. Wird der Motor allmählich belastet, so nimmt die Phasenverschiebung ab und die Stromstärke zu. Die

Leistung des Motors erreicht für eine Schlüpfung von 50 % ihr Maximum; denn dann ist die im Anker verzehrte Energie gleich der nutzbaren, und der Wirkungsgrad beträgt 50 %. Nimmt die Schlüpfung ab, so wächst der Wirkungsgrad, nimmt sie zu, so sinkt er.

Liesse sich ein Motor unter den angenommenen Bedingungen wirklich in Betrieb setzen, so wäre sein Gang völlig stabil. Mit zunehmender Belastung würde die Geschwindigkeit sinken und dementsprechend das Drehungsmoment wachsen; beim Angehen wäre das Drehungsmoment am grössten. Es stimmt dies also genau mit unsern Wünschen überein. In Wirklichkeit sind jedoch solche Bedingungen nicht zu erfüllen. Denn einmal lassen sich Motoren ohne magnetische Streuung nicht bauen; sodann können auch die Spulen der Feldmagnete den starken Strom nicht aushalten, den der Motor beim Angehen nöthig hätte. Um einen guten Wirkungsgrad zu erzielen, müssten wir den Motor mit einer geringen Schlüpfung arbeiten lassen: es entspräche dies einem Punkte auf dem rechten Ende der Abscissenachse. Ferner wäre die Wicklung der Feldmagnete der entsprechenden Stromstärke anzupassen; sie könnte daher, wie gesagt, den viel stärkern Strom nicht ertragen, der nach dem Vektordiagramm für das Angehen erforderlich ist.

Wir kommen nun zu den Motoren, wie sie im wirklichen Betriebe vorkommen. Hier liegen die Verhältnisse in der Mitte zwischen den beiden Extremen, die wir soeben betrachtet haben.

Wollen wir die Betriebsverhältnisse des wirklichen Motors untersuchen, so müssen wir alle Verluste und Unvollkommenheiten einer solchen Maschine berücksichtigen. Die Verluste zerfallen in mechanische, magnetische und elektrische und haben ihre Ursache in der Reibung, dem Luftwiderstande, der Hysteresis, den Wirbelströmen und dem Widerstande der Feldmagnetwicklung. Die Unvollkommenheiten rühren von der magnetischen Streuung her, die durch die entgegengesetzt gerichteten magnetisirenden Wirkungen des Magnetrings und des Ankers längs des Luftzwischenraums zwischen der Anker- und der Feldmagnetwicklung zu Stande kommt. Je schmaler man diesen ringförmigen Raum herstellt und je näher man die Leiter an seine Begrenzungsflächen heranbringt, um so mehr wird der Raum eingeengt, in dem diese Streuung stattfinden kann, und um so vollkommener wird die Maschine. In Folge der Streuung entsteht eine der Stromstärke proportionale elektromotorische Gegenkraft in den Ankerdrähten, deren Phase um 90° gegen die Phase des Stromes verschoben ist. Die elektromotorische Kraft und der Strom im Anker sind daher nicht mehr in gleicher Phase, und die Leistung des Motors wird geschwächt. Die Verhältnisse liegen also gerade so, als ob die Ankerdrähte ausser dem Leitungswiderstande auch Selbstinduktion besässen. In Folge dessen treffen die Annahmen, die für Fig. 107 gültig sind, nicht mehr zu, da die Stromstärke in einem beliebigen Ankerstabe nicht mehr ihren höchsten Werth hat, wenn er die Stelle passirt, wo das Feld am stärksten ist. Die Strecke $O J_a$ (Fig. 107) fällt nicht mehr mit OB zusammen, sondern schliesst mit ihr einen gewissen Winkel ψ ein. Dieser Winkel wächst mit der Geschwindigkeit N, wie sich leicht aus der folgenden Betrachtung ergiebt.

Wir behalten die alte Anschauung bei, dass das Feld im Raum fest ist und dass der Anker durch einen Riemen rückwärts gedreht wird. Bezeichnet dann E diejenige elektromotorische Kraft, die in jedem Leiter an der Stelle, wo das Feld B am stärksten ist, inducirt wird, so haben wir

$$E = \pi N F.$$

E setzt sich aus den beiden Komponenten E_s und E_w zusammen, von denen E_s die Selbstinduktion L und E_w den Leitungswiderstand ϱ zu überwinden hat. Bedeutet J die maximale Stromstärke in einem Leiter, so wird

$$E_s = 2 \pi N L J \text{ und } E_w = \varrho J,$$

also

$$\operatorname{tg} \psi = 2 \pi N \frac{L}{\varrho}.$$

Da L und ϱ für eine gegebene Maschine Konstanten sind, so lässt sich der Winkel ψ für jede Geschwindigkeit bestimmen. Ist ψ bekannt, so folgt aus der Beziehung

$$E_w = E \cos \psi$$

für die maximale Stromstärke

$$J = \frac{\pi N F}{\varrho} \cos \psi \times 10^{-8} \text{ Ampère}$$

und für die effektive Stromstärke

$$i = \frac{\pi N F}{\varrho \sqrt{2}} \cos \psi \times 10^{-8} \text{ Ampère. . . . . . . (71)}$$

Vergleichen wir diesen Ausdruck mit Formel (66), so zeigt sich, dass die Stromstärke im Verhältnis von $1 : \cos\psi$ verringert ist. Gleichzeitig wird das Drehungsmoment kleiner. Je grösser die Selbstinduktion oder je breiter der Zwischenraum zwischen den beiden Wicklungen ist, um so grösser wird $\operatorname{tg}\psi$ und um so kleiner $\cos\psi$, sodass die magnetische Streuung allein schon aus diesem Grunde die Leistung des Motors herabsetzt. Das Drehungsmoment erfährt jedoch noch weiter eine Abnahme, weil die höchsten Werthe der Stromstärke und der Feldstärke nicht mehr zusammenfallen, sondern um den Winkel ψ gegeneinander verschoben sind. Nun wird die tangentiale Zugkraft, die die eine Ankerhälfte ausübt, durch Integration des Ausdrucks

$$\frac{\nu\, l\, J\, B}{2\,\pi} \cos(\psi + \alpha) \cos\alpha\, d\alpha$$

zwischen den Grenzen $\alpha = \frac{\pi}{2}$ und $\alpha = -\frac{\pi}{2}$ gefunden. Die gesammte tangentiale Zugkraft ist doppelt so gross, also

$$P = \frac{\nu\, l\, J\, B}{2} \cos\psi \times 10^{-1} \text{ Dynen}$$

oder

$$P = \frac{\nu\, l\, J\, B}{2 \times 9{,}81} \cos\psi \times 10^{-6} \text{ kg*} \quad . \; . \; . \; . \quad (72)$$

Vergleichen wir diesen Ausdruck mit Formel (62), so zeigt sich, dass die Zugkraft bei gleicher Stärke des resultirenden Feldes und des Ankerstroms im Verhältnis von $1 : \cos\psi$ verringert ist. Nun ist aber auch die Stromstärke in den Ankerdrähten, wie wir oben sahen, ebenfalls im Verhältnis $1 : \cos\psi$ kleiner. Bezeichnet daher T_0 das Drehungsmoment des idealen Motors und T das des wirklichen Motors, so gilt die Beziehung

$$T = T_0 \cos^2\psi. \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad (73)$$

Die Leistung A des Motors (in Watt) ergiebt sich durch Multiplikation von P mit $2\,\pi\, r\, N_2 \times 10^{-7}$ zu

$$A = \nu\, e\, i \cos^2\psi, \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad (74)$$

wo i und e die durch Formel (67) und (68) gegebenen Werthe besitzen. Die letzte Gleichung zeigt, dass die Leistung des Motors im Verhältnis von $1 : \cos^2\psi$ verringert ist. Man hat daher darauf zu achten, dass die magnetische Streuung möglichst klein bleibt. Es ist also der Luftzwischenraum δ so eng zu wählen, wie es die freie Bewegung des Ankers nur irgend gestattet, und die Bohrungen für die Anker- und Feldmagnetstäbe sind möglichst nahe an der Oberfläche anzubringen.

Nun ist der Winkel ψ nicht konstant, sondern hängt von der Geschwindigkeit N ab. Unter normalen Bedingungen ist allerdings N und folglich auch ψ klein. Die Schwächung des Drehungsmoments, die durch die magnetische Streuung bewirkt wird, kommt daher wenig in Frage, wenn der Motor seine normale Geschwindigkeit erreicht hat. Aber beim Angehen, wo $N = N_1$ ist, hat der Winkel ψ einen grossen Werth, folglich $\cos^2 \psi$ einen sehr kleinen. Die magnetische Streuung setzt deshalb das Drehungsmoment des Motors, besonders beim Angehen, in einem Grade herab, der von dem Betrage der Grössen ϱ und L abhängt. Mit Rücksicht auf Formel (67) ist ϱ klein zu wählen, damit man eine hohe Stromstärke im Anker, also ein grosses Drehungsmoment und einen hohen Wirkungsgrad bei normaler Geschwindigkeit erhält. Anderseits wird aber ψ gross, wenn ϱ klein ist, so dass das Drehungsmoment beim Angehen nur gering sein kann. In der Praxis sucht man, wie schon auf S. 244 gezeigt ist, bei grössern Motoren diesen beiden Bedingungen, die in gewissem Grade einander widerstreiten, dadurch gerecht zu werden, dass man den Widerstand ϱ beim Angehen gross wählt und ihn nachher allmählich verkleinert, wenn der Motor die richtige Geschwindigkeit angenommen hat.

Wir haben bisher stillschweigend vorausgesetzt, dass das resultirende Feld B stets konstant bleibt. Dies ist jedoch augenscheinlich in dem Falle unmöglich, der allein in der Praxis in Frage kommt, wo die elektromotorische Kraft des zugeführten Stromes konstant gehalten wird. Denn wegen der Selbstinduktion und des Widerstandes der Feldmagnetwicklung nimmt bei wachsender Stromstärke nothwendiger Weise diejenige Komponente der Spannung der Zuleitungen ab, die in gleicher Phase mit der Feldstärke B ist. In Folge dessen ist das Gesammtfeld F nicht konstant, sondern wird mit wachsender Stärke des zugeführten Stromes kleiner und bewirkt somit weiter eine Verringerung des Drehungsmoments. Wir wollen hierauf näher eingehen, jedoch der Einfachheit halber dabei zunächst von der Hysteresis, den Wirbelströmen und den mechanischen Verlusten absehen oder vielmehr für diese Verluste eine bestimmte

Leistung einführen, die wir von der verfügbaren Leistung abziehen. Da die Geschwindigkeit der Maschine bei normalem Gange nahezu konstant ist, so kann auch die Summe dieser Verluste, die stets nur einen geringen Theil der ganzen Leistung ausmacht, als konstant angenommen werden.

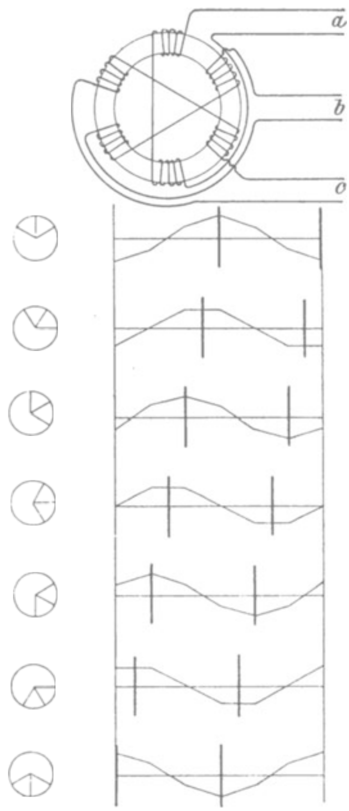


Fig. 109.

Unter diesen Voraussetzungen besteht unsere Aufgabe darin, für eine bestimmte Spannung und eine bestimmte Periodenzahl des zugeführten Stromes das Drehungsmoment und die Leistung bei verschiedenen Geschwindigkeiten des Ankers zu bestimmen. Zuerst ist die Beziehung zwischen der Stromstärke in der Feldmagnetwicklung und dem primären Felde und zwischen dem resultirenden

Felde und der elektromotorischen Gegenkraft zu untersuchen. Für ein zweiphasiges Feld ist dies schon durchgeführt; wir behandeln jetzt das dreiphasige Feld in derselben Weise und setzen der Einfachheit halber voraus, die Magnetwicklung sei so vertheilt, dass ein Feld mit zwei Polen entsteht. Fig. 109 zeigt einen Gramme'schen Ring, der mit drei Paaren von Feldmagnetspulen bewickelt ist; je zwei benachbarte Spulen sind um 60° von einander entfernt. Bei der Trommelwicklung, die in magnetischer Beziehung gar nicht von der Ringwicklung abweicht, würden drei einzelne Spulen einzuführen sein, die um 120° von einander entfernt wären. Wir haben für den vorliegenden Zweck die Gramme'sche Wicklung vorgezogen, weil sie sich leichter durch eine Zeichnung darstellen lässt; diese ist in derselben Weise angelegt, wie Fig. 101, und bedarf daher weiter keiner Erklärung. Die gebrochene Linie, die die Feldstärke an verschiedenen Punkten des Umfangs darstellt, kommt einer Sinuskurve ziemlich nahe. Die Lage der Pole ist jedes Mal durch dicke vertikale Linien dargestellt, sodass man sofort erkennen kann, wie die Pole mit der Phasenänderung des Drehstromes fortschreiten. Ferner sieht man, dass die erregende Kraft, die der maximalen Feldstärke an den Polen entspricht, in engen Grenzen schwankt, nämlich zwischen $2\,J\nu'$ und $\sqrt{3}\,J\nu'$. J bedeutet hier die maximale Stromstärke in jedem Zweige und ν' die Zahl der wirksamen Leiter in einer Spule oder den sechsten Theil aller auf dem Umfang vorhandenen Drähte. Derselbe Ausdruck gilt natürlich auch für die Trommelwicklung. Die mittlere erregende Kraft liegt zwischen diesen beiden Werthen und ist gleich $1{,}865\,J\nu'$. Führen wir statt der maximalen Stromstärke J die effektive i ein, so finden wir für die erregende Kraft der Feldmagnetspulen (in Ampèrewindungen)

$$X_c = 2{,}635\, i\, \nu'.$$

Die Stromstärke, die in jedem der drei Zweige zur Erzeugung dieser erregenden Kraft X_c erforderlich ist, wird daher durch die folgende Gleichung dargestellt:

$$i = 0{,}38\,\frac{X_c}{\nu'} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (75)$$

Es dürfte von Interesse sein, diesen Ausdruck mit Formel (69) zu vergleichen, die sich auf die Stromstärke in der Wicklung eines zweiphasigen Feldes bezieht. Dort bedeutet ν' den vierten Theil der Gesammtzahl Σ der Drähte auf den Feldmagneten, hier jedoch nur den sechsten Theil. Betrachten wir nun zwei Feldmagnete von ganz gleicher Form, deren Wicklungen dieselbe Anzahl von Drähten besitzen, von denen aber die eine für Zweiphasenstrom, die andere für Dreiphasenstrom angeordnet ist, so ergiebt sich für die Stromstärke in der Wicklung des Feldmagnets beim Dreiphasenmotor

$$i = 2{,}28 \frac{X_c}{\Sigma}$$

und beim Zweiphasenmotor

$$i = 2{,}40 \frac{X_c}{\Sigma}.$$

Der Dreiphasenmotor gebraucht also um $5\,\%$ weniger Strom als der Zweiphasenmotor, und der Querschnitt des Drahtes auf dem Feldmagnet kann bei gleichem Spannungsverlust in der Wicklung im ersten Falle um $5\,\%$ kleiner gewählt werden.

Bei dem Dreiphasenmotor spart man also etwas an Kupfer bei der Wicklung der Feldmagnete. Wegen der geringern Stromstärke, die der Motor zu seiner Erregung nöthig hat, ist aber auch seine Leistung bei gleichem Energieverbrauch etwas grösser; es ist dies um so mehr der Fall, als auch die elektromotorische Gegenkraft, die in einer gegebenen Anzahl von Windungen entsteht, bei dem Dreiphasenmotor stärker ist. Es geht dies aus folgender Betrachtung hervor, in der φ den Winkel bedeutet, den ein nach der Mitte einer Feldmagnetspule gezogener Radius in einem bestimmten Augenblick mit der Richtung des Feldes B bildet, und α den Winkelabstand eines Elementes der Wicklung vom Mittelpunkt der Spule. Da ν' Drähte auf den Winkel $\frac{\pi}{3}$ kommen, so sind $\frac{3}{\pi} \nu' \, d\alpha$ Drähte innerhalb des unendlich kleinen Winkels $d\alpha$ enthalten. An der Stelle, wo sich die elementare Gruppe von Drähten befindet, herrscht die Induktion $B \cos(\alpha - \varphi)$, und die daselbst erzeugte elektromotorische Kraft ist gleich

$$de = 2\pi r N_1 l B \cos(\alpha - \varphi) \times \frac{3}{\pi} \nu' \, d\alpha.$$

Diese Gleichung ist zwischen den Grenzen $\alpha = \frac{\pi}{6}$ und $\alpha = -\frac{\pi}{6}$ zu integriren und liefert dann

$$e = 6\,r\,l\,B\,N_1\,\nu'\cos\varphi$$

in absolutem Maass. Die elektromotorische Kraft, die in einer Feldspule entsteht, ist daher eine Sinusfunktion und besitzt den maximalen Werth

$$E = 3\,F N_1\,\nu'.$$

In der gegenüberliegenden Spule, die zu demselben Paar gehört, wird eine gleiche elektromotorische Kraft inducirt; da diese beiden Spulen hintereinander geschaltet sind, so beträgt die maximale elektromotorische Kraft in jedem Kreise des Systems

$$E = 6\,F N_1\,\nu' \times 10^{-8} \text{ Volt.}$$

Die effektive elektromotorische Kraft wird dementsprechend

$$e = 4{,}26\,F N_1\,\nu' \times 10^{-8} \text{ Volt.} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (76)$$

Nach Formel (68) ergiebt sich für die elektromotorische Kraft in jedem Kreise eines zweiphasigen Systems ein ähnlicher Ausdruck, bei dem nur die Zahl 4 an Stelle des Koefficienten 4,26 tritt. Die elektromotorische Gegenkraft ist daher bei gleicher Stärke des Gesammtfeldes und bei gleicher Zahl der Windungen in einem Kreise beim Dreiphasenmotor um 6,5 % grösser als beim Zweiphasenmotor.

Um jedoch die Vergleichung der beiden Maschinen richtig durchzuführen, dürfen wir nicht annehmen, dass die Windungszahl ν' bei beiden dieselbe ist. Wir haben zwei Felder von gleicher Stärke und gleicher Gesammtzahl Σ der Windungen, die jedoch in einem Falle für den Dreiphasenstrom und im andern für den Zweiphasenstrom angeordnet sind. i und e mögen beim Zweiphasenmotor und i_1 und e_1 beim Dreiphasenmotor die Stromstärke und elektromotorische Gegenkraft in den Feldspulen bedeuten. Wird dann bei beiden ein Draht von gleichem Querschnitt für die Wicklung der Feldmagnete verwandt, so ist, wie wir vorher zeigten, $i_1 = 1{,}05\,i$. Beim Zweiphasenmotor haben wir

$$e = F N_1\,\Sigma \times 10^{-8},$$

und beim Dreiphasenmotor

$$e_1 = 0{,}71\,F N_1\,\Sigma \times 10^{-8},$$

sodass

$$e_1 = 0{,}71\,e.$$

Die scheinbare Leistung in jedem Kreise beträgt dann beim Zweiphasenmotor

$$a = e\, i$$

und beim Dreiphasenmotor

$$a_1 = e_1\, i_1.$$

Die scheinbare Gesammtleistung aller Kreise wird daher beim Zweiphasenmotor

$$A = 2\, e\, i$$

und beim Dreiphasenmotor

$$A_1 = 3\, e_1\, i_1 = 2{,}23\, e\, i,$$

also

$$A_1 = 1{,}115\, A.$$

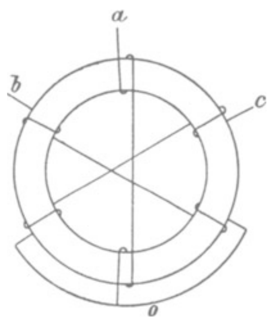


Fig. 110.

Bei gleichem Kupfergewicht leistet daher der Dreiphasenmotor etwa 11 % mehr als der Zweiphasenmotor, oder bei gleicher Leistung kann der erstere um 10 % leichter gehalten werden.

In Fig. 109 sind die drei Stromkreise für die Feldmagnete völlig getrennt von einander gezeichnet; bei einer solchen Anordnung wären daher sechs Leitungen zwischen Generator und Motor erforderlich. Die Zahl der Zuleitungen kann jedoch auf drei beschränkt werden, wenn die Kreise so verbunden sind, wie es Fig. 110 darstellt. Die Spulen, die zu einem Paar gehören, sind, wie früher, über Kreuz verbunden, sodass sechs freie Enden bleiben. Drei derselben sind durch den Draht *o* verbunden, während die drei andern, die mit *a*, *b* und *c* bezeichnet sind, zu den drei Zuleitungen geführt werden.

Diese Anordnung wird gewöhnlich *Sternschaltung* genannt, da die drei Zuleitungen radial von dem elektrischen Centrum o des Sternes ausgehen; Fig. 110a zeigt dies deutlicher. Man sieht leicht, dass die Erregung der Feldmagnete unter diesen Umständen genau dieselbe ist, als wenn die drei Kreise völlig unabhängig von einander sind. Die Summe der drei in a, b und c verlaufenden Ströme muss nämlich stets Null sein, und wenn man die drei Rückleitungen zu einer vereinigte, so hätte diese den Strom Null fortzuleiten; sie kann daher ganz fortgelassen werden. Der Mittelpunkt o ist gewöhnlich an Erde gelegt, sodass das Potential jeder Leitung innerhalb der Grenzen der Spannung des Generators liegt.

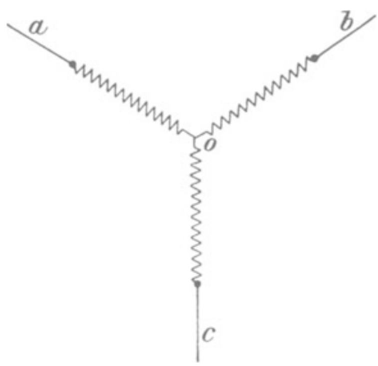


Fig. 110a.

Eine zweite Anordnung stellt Fig. 111 dar; sie wird *Dreiecksschaltung* genannt, was Fig. 111a erklärt. Hier haben wir kein elektrisches Centrum, das an Erde gelegt werden kann; die Spulen bilden vielmehr ein Dreieck oder einen geschlossenen Kreis, zu dem die Zuleitungen an drei gleichweit von einander entfernten Stellen geführt sind. Betrachten wir die Zeichnung genauer und verfolgen den Verlauf der einzelnen Ströme in den Spulen, so zeigt sich, dass die Felderregung in diesem Falle in anderer Weise vor sich geht als bei der Sternschaltung. In dem Augenblicke, wo einer der Ströme, z. B. a, durch Null geht, erzeugen die beiden andern, b und c, eine erregende Kraft von 1,3 $J\nu'$ Ampèrewindungen, während dieselbe ein Sechszehntel der Periode später, wenn der Strom in b seine höchste Stärke und der Strom in a und in c die Hälfte der höchsten

Stärke besitzt, nur $J\nu'$ Ampèrewindungen beträgt. Die Schwankungen der erregenden Kraft sind daher bei der Dreiecksschaltung bedeutend stärker als bei der Sternschaltung. Die erregenden Kräfte sind für diese beiden Schaltungsarten in der folgenden Tabelle zu-

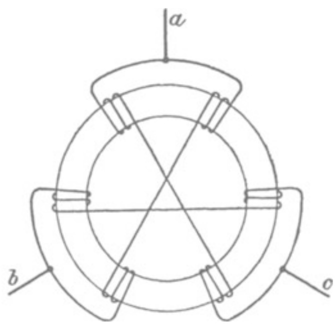


Fig. 111.

sammengestellt, in der gleichzeitig noch eine dritte Wicklungsweise, die sogenannte *Kombinationsschaltung*, berücksichtigt worden ist, auf die wir sogleich kommen werden.

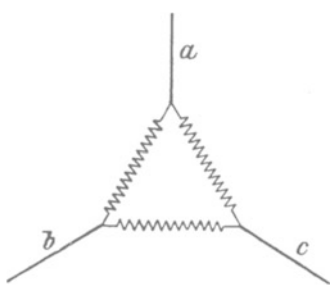


Fig. 111 a.

Die Stromstärke in einer der Leitungen	Felderregung in Ampèrewindungen		
	Sternschaltung	Dreiecks-schaltung	Kombinations-schaltung
ist Null	$1{,}73\, J\nu_1'$	$1{,}3\, J\nu_0'$	$1{,}515\, J\nu'$
hat den höchsten Werth	$2\, J\nu_1'$	$J\nu_0'$	$1{,}500\, J\nu'$

ν_1', ν_0' und ν' bezeichnen hier die Zahl der Drähte, welche den sechsten Theil des Umfanges des Magnetrings bei der Stern-, Dreiecks- oder Kombinationsschaltung bedecken. Für dieselbe mittlere erregende Kraft ist ν_0' grösser als ν_1', und zwar besteht in diesem Falle die Beziehung: $\nu_0' = 1{,}61\,\nu_1'$.

Die Schwankungen, die die erregende Kraft nach der obigen Tabelle erleidet, rufen jedoch in der Ankerwicklung Ströme hervor, die einer Aenderung der Feldstärke entgegenwirken, die in Folge dessen nahezu konstant bleibt. Diese Ströme verzehren freilich Energie und verringern den Wirkungsgrad des Motors. Um diesem Uebelstande abzuhelfen, hat von Dolivo-Dobrowolsky die beiden Schaltungsarten kombinirt und dadurch erreicht, dass sich die erregende Kraft der Feldmagnete fast gar nicht ändert. Bezeichnet $\nu' = \nu_1' + \nu_0'$ die Summe der Drähte bei der Stern- und der Dreiecksschaltung und wählt man $\nu_1' = \nu_0' = {}^1/_2\,\nu'$, so ist die erregende Kraft bei dem Zusammenwirken der beiden Wicklungen gleich $1{,}515\,J\nu$ und $1{,}500\,J\nu$, wie die dritte Reihe der obigen Tabelle angiebt. Die grösste Abweichung von der mittlern erregenden Kraft beträgt daher bei

Sternschaltung	7,25 %
Dreiecksschaltung	13,0
Kombinationsschaltung	0,5
Zweiphasen-Strom	17,0.

Es sind uns nun alle Grössen gegeben, um auf graphischem Wege die Betriebsbedingungen des Motors zu bestimmen. Die Beziehung zwischen dem Widerstande und der Selbstinduktion der Ankerleiter wurde als bekannt vorausgesetzt, so dass sich der Winkel ψ, um den der Ankerstrom hinter dem resultirenden Felde B zurückbleibt, für jede Geschwindigkeit N bestimmen lässt. Unter Geschwindigkeit ist hier die relative Geschwindigkeit des Ankers gegen die Feldmagnete verstanden. Das gesammte Feld F und die maximale Induktion B wählen wir so hoch, wie der Wirkungsgrad und die Erwärmung es gestatten. Ist die radiale Tiefe δ des Luftzwischenraums bekannt, so liefert die Gleichung

$$X_b = 1{,}6\,\delta B$$

die resultirende erregende Kraft, die zur Erzeugung der maximalen Induktion B erforderlich ist. Die beiden Komponenten dieser erregenden Kraft bilden die Ampèrewindungen X_a des Ankers, die durch Gleichung (63) bestimmt sind, und die Ampèrewindungen X_c der Magnetwicklung. Letztere werden auf graphischem Wege gefunden; die entsprechende Stromstärke in der Feldmagnetwicklung ergiebt sich aus Gleichung (75), während Gleichung (76) die effektive elektromotorische Gegenkraft in einer Feldmagnetwicklung bestimmt. Die Lage und Grösse der primären elektromotorischen Kraft lassen sich gleichfalls auf graphischem Wege finden, wenn der Widerstand und die Selbstinduktion der Magnetwicklung bekannt sind. Diese Konstruktion liefert die Spannung und die Stromstärke, welche bei einer bestimmten Geschwindigkeit N eine bestimmte Induktion B erzeugen.

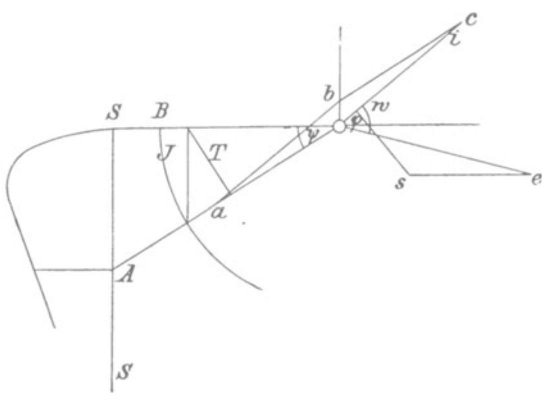


Fig. 112.

In der Praxis tritt uns jedoch diese Aufgabe in anderer Form entgegen. Hier wollen wir das Drehungsmoment und die Leistung als Funktion der Geschwindigkeit kennen, wenn die Spannung des zugeführten Stromes einen bestimmten gegebenen Werth hat. Aus der einen Lösung ergiebt sich jedoch leicht die andere. Wir nehmen einen bestimmten Werth für B und N an und finden den zugehörigen Betrag der zugeführten Spannung. Stimmt dieser nicht mit dem gegebenen überein, so haben wir nur sämmtliche Strecken in der Zeichnung um so viel zu vergrössern oder zu verkleinern, dass die zugeführte Spannung auf den richtigen Werth kommt.

Fig. 112 stellt ein solches Vektordiagramm dar. Sind alle Konstanten der Maschine gegeben, so liefert die Gleichung

$$\operatorname{tg}\psi = 2\pi N \frac{L}{\varrho}$$

den Winkel ψ für eine beliebige Geschwindigkeit N. Die Geschwindigkeit lässt sich also auf der Vertikalen SS auftragen, die von O um $\frac{\varrho}{2\pi L}$ entfernt ist, wobei der Maassstab für N beliebig gewählt wird.

Nehmen wir einen bestimmten Werth für die Induktion B oder für die gesammte Feldstärke F an, so ergiebt sich der Ankerstrom J (in Ampère) aus einer der beiden Gleichungen:

$$J = \frac{\pi N F}{\varrho} \cos\psi \times 10^{-8},$$

$$J = \frac{F}{2L} \sin\psi \times 10^{-8}.$$

Der zweite Ausdruck ist bequemer und gestattet, die Werthe von J auf einem Kreise abzulesen, der um O als Mittelpunkt mit dem Radius $OB = \frac{F}{2L} \times 10^{-8}$ beschrieben wird. Die erregende Kraft des Ankers ergiebt sich dann zu

$$X_a = \frac{\nu J}{\pi};$$

in der Zeichnung entspricht ihr die Strecke Oa auf dem Radius OA. Ob möge in demselben Maassstabe die erregende Kraft X_b für die resultirende Induktion B darstellen; sie ist bestimmt durch die Gleichung

$$X_b = 1{,}6\,\delta B.$$

Alsdann giebt die Strecke Oc die erregende Kraft X_c der Feldmagnetwicklung im gleichen Maassstabe an, und die Stromstärke in jedem Kreise des Dreiphasen-Motors ist durch die Gleichung

$$i = 0{,}38 \frac{X_c}{\nu'}$$

bestimmt. Der Spannungsverlust, der in Folge des Leitungswiderstandes in jedem Kreise der Feldmagnetwicklung auftritt, kann nun berechnet und im passenden Maasstabe auf Oc abgetragen werden. Er werde durch Ow dargestellt. $e_s = ws$ bedeute im gleichen

Maassstabe die Spannung, die zur Ueberwindung der Selbstinduktion im Kreise jeder Magnetwicklung erforderlich ist. Die Grösse dieser Spannung lässt sich angeben, wenn der Selbstinduktionskoefficient bekannt ist; als Periodenzahl ist natürlich N_1 anzunehmen. Die elektromotorische Gegenkraft, welche vom resultirenden Felde F herrührt, ist durch die Gleichung

$$e_g = 4{,}26\, N_1\, F \nu' \times 10^{-8}$$

gegeben und muss von s aus horizontal nach rechts aufgetragen werden. Wir erhalten somit die gesammte zugeführte Spannung $e = Oe$, die der Stromstärke um den Winkel φ in der Phase voraneilt. Die gesammte Effektaufnahme wird daher

$$A = 3\, e\, i \cos \varphi.$$

Da das Drehungsmoment bei konstanter Feldstärke proportional $J \cos \psi$ ist, so stellt die Strecke T, die auf dem Radius OA rechtwinklig steht, augenscheinlich im geeigneten Maassstabe das Drehungsmoment für eine beliebige Geschwindigkeit unter der Bedingung dar, dass das Feld konstant ist. In Wirklichkeit wird dies jedoch nicht zutreffen.

Ist nun die Strecke Oe, die die obige Konstruktion liefert, grösser oder kleiner als der gegebene Werth der zugeführten Spannung, so sind sämmtliche Strecken des Vektordiagramms, mit Ausnahme von OS und SA, im entsprechenden Verhältnis zu vergrössern oder zu verkleinern, die Winkel bleiben jedoch ungeändert. Ist m das Verhältnis zwischen der gegebenen und der graphisch bestimmten Spannung, so haben die richtige Stromstärke und die richtige Spannung den $m$fachen Betrag der eingezeichneten Werthe. Die richtige Induktion wird mB und die richtige Feldstärke wird mF sein. Die Effektaufnahme des Motors wird $m^2 A$ und das Drehungsmoment $m^2 T$ betragen. Die richtigen Werthe des Drehungsmoments und der verfügbaren Leistung können daher als Funktion der Geschwindigkeit dargestellt werden. Zu diesem Zwecke dient die Kurve, die links von der Linie SS gezeichnet ist. Die Aufgabe ist damit gelöst.

Es ist von Interesse, auf den grossen Einfluss aufmerksam zu machen, den die magnetische Streuung (Selbstinduktion im Anker und in den Feldmagneten) auf das Verhalten eines solchen Motors hat. In Fig. 113 stellt die Kurve A_1 das Drehungsmoment eines

Motors dar, bei dem $\frac{2\pi L}{\varrho} = 0{,}02$ ist und dessen Feldmagnetwicklung bei voller Belastung eine Selbstinduktion von 15 % der zugeführten Spannung besitzt. Die Kurve A_2 bezieht sich auf einen Motor, für den diese beiden Werthe verdoppelt sind.

Bislang haben wir die Selbstinduktion im Anker und in den Feldmagneten als bekannt vorausgesetzt. Aus naheliegenden Gründen ist es jedoch nicht möglich, die Selbstinduktion auf rein rechnerischem Wege zu bestimmen; man muss deshalb schon auf das Experiment zurückgreifen, um Werthe zu erhalten, die später bei den Konstruktionen benutzt werden. Wir lassen einen fertigen Motor bei voller Belastung laufen und bestimmen Spannung und Stärke des zugeführten Stromes. Dies liefert die Länge der Strecken Oi und Oe (Fig. 112), aber nicht ihre gegenseitige Lage. Um diese zu ermitteln, haben wir die Effektaufnahme zu messen und erhalten

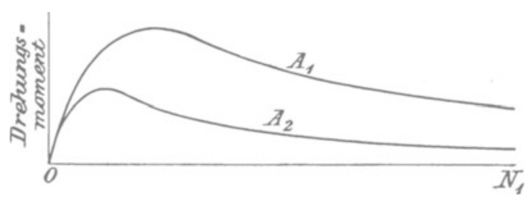


Fig. 113.

aus dem Verhältnis des so gemessenen Werthes zu dem Produkt aus Spannung und Stromstärke den Kosinus der Phasenverschiebung φ oder den *Leistungsfaktor* des Motors bei voller Belastung. Mit Hülfe der bekannten Grössen können wir jetzt die Zeichnung vervollständigen und finden so den Winkel ψ, der das Verhältnis $\frac{L}{\varrho}$ bestimmt.

Die Selbstinduktion der Feldmagnetwicklung kann auf folgende Weise annähernd bestimmt werden. Die Ankerachse wird festgekeilt, so dass sie sich nicht drehen kann, und die zugeführte Spannung so erniedrigt, dass die Stromstärke in der Magnetwicklung nicht höher ansteigt als bei voller Belastung des Motors. Es ist unter diesen Umständen $N = N_1$; bei dieser hohen Periodenzahl wird ein äusserst schwaches resultirendes Feld B genügen, um kräftige Ströme im Anker zu erzeugen. Dies bedeutet, dass sich die Strecke Ob (Fig. 112) und die elektromotorische Gegenkraft se beide dem

Werthe Null nähern. Da der Spannungsverlust wegen des Leitungswiderstandes in der Magnetwicklung stets sehr klein ist, so wird die Strecke Oe nahezu gleich ws. Die gemessene Spannung ist daher annähernd gleich der Selbstinduktion für die betreffende Stromstärke, die bei den getroffenen Versuchsbedingungen der Stromstärke bei normaler Belastung gleich ist.

Die maximale Stärke des resultirenden Feldes ergiebt sich, wenn man den Motor bei normaler Spannung unbelastet laufen lässt. Unter diesen Umständen wird ein sehr schwacher Ankerstrom genügen, um den Motor im Gange zu erhalten; in Folge dessen ist die erregende Kraft des Ankers so schwach, dass sie keine wesentliche Rückwirkung auf das Feld ausübt. Der Radius Vektor Oi kommt dann vertikal zu liegen; die Selbstinduktion und die elektromotorische Gegenkraft fallen daher in eine Gerade, sodass die zugeführte Spannung gleich ihrer Summe wird. Da sich die Selbstinduktion für jede Stromstärke nach der eben angegebenen Methode bestimmen lässt, so ergiebt sich die elektromotorische Gegenkraft als Differenz der zugeführten Spannung und der Selbstinduktion. Aus der elektromotorischen Gegenkraft und aus der Windungszahl der Magnetwicklung lässt sich leicht die Stärke des resultirenden Feldes mittels der oben aufgestellten Formeln ableiten.

Man kann auf diese Weise durch einige einfache Versuche eine gewisse Zahl von elektrischen Konstanten ermitteln, die sich nicht im Voraus berechnen lassen. Um die Betriebsbedingungen eines Mehrphasenmotors gründlich zu untersuchen, sind natürlich umfassendere Versuche anzustellen, von denen die direkte Bestimmung der magnetischen Streuung bei Leerlauf und voller Belastung wohl am wichtigsten ist. Das Verhältnis des im Anker wirklich ausgenutzten Induktionsflusses zu dem in den Feldmagneten erzeugten heisst *Streuungsfaktor*; je mehr sich derselbe der Einheit nähert, um so geringer ist die Selbstinduktion des Ankers und der Feldmagnete und desto vollkommener ist der Motor.

Der Streuungsfaktor lässt sich durch folgenden Versuch ermitteln, den E. Kolben an einem 9pferdigen Dreiphasenmotor mit 6 Polen ausgeführt hat. Die Feldmagnetwicklung besteht hier aus 36 Spulen mit je 7 Windungen; die Ankerwicklung umfasst 90 Stäbe, die in Bohrungen liegen und in einer sechspoligen Trommelwicklung so angeordnet sind, dass sie drei von einander unabhängige, in sich geschlossene Kreise bilden. Um die magnetische Streuung beim

Leerlauf zu bestimmen, wird die richtige Ankerwicklung durch eine Versuchswicklung ersetzt, bei der nur 30 von den 90 Bohrungen je zwei Drähte enthalten, die alle hinter einander geschaltet sind und deren freie Enden zu einem Spannungsmesser führen. Jeder Kreis der Magnetwicklung enthält also $7 \times 12 = 84$ Windungen; auf dem Anker sind 60 Windungen angebracht. Durch die Feldmagnetwicklung wird nun ein Strom von gegebener Spannung und Periodenzahl geschickt und gleichzeitig die in dem Versuchsanker inducirte elektromotorische Kraft mittels des Spannungsmessers bestimmt. Der Anker wird dabei mit der Hand langsam gedreht, sodass er verschiedene Stellungen gegen den Feldmagnet annimmt. Wegen der Dreiphasenwicklung wichen die dabei gefundenen Werthe der Spannung etwas von einander ab und betrugen im vorliegenden Falle im Mittel 60,5 Volt.

Wir wissen jetzt, der Induktionsfluss im Anker besitzt eine solche Stärke, dass er in den 60 Windungen der Ankerspule eine effektive elektromotorische Kraft von 60,5 Volt erzeugt. Zu gleicher Zeit durchsetzt ein Induktionsfluss von etwas grösserer Stärke die Feldmagnetspulen mit 84 Windungen und erzeugte in ihnen eine elektromotorische Gegenkraft von 98 Volt, die mit einem an die Enden dieser Spulen angelegten Spannungsmesser bestimmt wurde. Wäre der Induktionsfluss im Anker und in den Feldmagneten derselbe gewesen, so müssten sich die gemessenen Spannungen wie die Windungszahlen verhalten. Da jedoch ein Theil der Kraftlinien in Folge der magnetischen Streuung verloren geht, so erfährt die elektromotorische Kraft des Ankers eine entsprechende Verminderung. Der Streuungsfaktor ist also gleich

$$\frac{60{,}5}{60} : \frac{98}{84} = 0{,}865,$$

d. h. von je 1000 Kraftlinien, die in den Feldmagneten erzeugt werden, gehen 135 in dem Raume zwischen Feld- und Ankerwicklung verloren.

Dies gilt für die Bedingungen, unter denen der Versuch angestellt wurde, also für den Fall, dass kein nennenswerther Strom im Anker fliesst. Die Verhältnisse erfahren dadurch keine Aenderung, dass der Anker unbelastet läuft, da auch in diesem Falle der Ankerstrom sehr schwach ist. Die Sachlage ändert sich, wenn der Motor belastet wird, da alsdann die erregende Kraft der Feldmagnete und des Ankers sehr verstärkt wird und die magnetische Spannung erheblich steigt. Um den Streuungsfaktor in diesem Falle zu bestimmen, wird der Motor mit seinem richtigen Anker versehen. Darauf schiebt man eine Probespule von 8 Windungen über einen der Pole des Feldmagnets und bringt sie möglichst nahe an den Anker heran. Bestimmt man die in dieser Spule inducirte elektromotorische Kraft bei unbelastetem und bei vollbelastetem Laufe des Motors, so ergiebt sich aus der Differenz der gemessenen Werthe der Betrag, um den der Streuungsfaktor durch die Belastung des Motors verringert ist. In der folgenden Tabelle sind die Ergebnisse der Messungen zusammengestellt.

	Umdrehungszahl	Periodenzahl (N)	Zugeführter Strom		Inducirte E.M.K. in Volt		Leistungsaufnahme in Watt	Streuungsfaktor in Procenten
			Spannung in Volt	Stärke in Ampère	in der Ankerspule	in der Probespule		
Stillstand	0	50	98	20,2	60,5	—	365	86,5
Leerlauf	980	49	98	22,3	—	26,0	500	86,5
Ueberlastung bis 12,5 P	930	49	98	45,7	—	24,5	10 260	81,5

Der Streuungsfaktor bei Ueberlastung ergiebt sich durch Multiplikation des Streuungsfaktors bei Leerlauf mit dem Verhältnis der Spannungen in der Probespule. Der Wirkungsgrad des Motors bei der Ueberlastung mit 12,5 P beträgt 90 % und der Leistungsfaktor, d. h. das Verhältnis der Leistungsaufnahme zu dem Produkt aus Stärke und Spannung der zugeführten Ströme, ergiebt sich zu

$$\frac{10\,260}{3 \times 98 \times 45{,}7} = 0{,}775.$$

Kolben hat noch einige grössere Dreiphasenmotoren mit Hülfe des Bremszaums untersucht und ihre Schlüpfung, ihren Wirkungsgrad und ihren Leistungsfaktor bestimmt. Die an zwei Maschinen gewonnenen Ergebnisse sind in der folgenden Tafel zusammengestellt.

	Leistung am Zaum in P	Leistung am Zaum in Watt	Stromstärke in jedem Zweige in Ampère	Spannung zwischen dem neutralen Punkte und jedem Leiter in Volt	Energieverbrauch in Watt als Produkt aus Spannung und Stromstärke	Energieverbrauch in Watt mit dem Leitungsmesser bestimmt	Leistungsfaktor in Procenten	Schlüpfung in Procenten bei Belastung und der Periodenzahl 50	Wirkungsgrad in Procenten
A. E. G.-Motor	60	44 160	318	60	57 240	48 300	84,4	2,0	91
Theoretische Umdrehungszahl 750	42	30 910	252	60	45 360	36 800	81,1	1,3	84
Ankerdrähte bilden	20	14 720	150	60	27 000	17 700	65,5	—	83
einen Trillerkäfig	0	0	125	60	22 500	—	—	—	—
Oerlikon-Motor									
Theoretische Umdrehungszahl 750	53,8	39 600	180	93	50 220	42 100	84,0	4,0	94
Anker mit Trommelwicklung aus 11 in	46,0	33 900	158	95	45 000	37 440	83,0	3,0	90,5
sich geschlossenen Kreisen	0	0	40	98	11 760	1 710	14,5	0	0

Zehntes Kapitel.

Einphasenmotor. — Allgemeine Beschreibung seines Verhaltens. — Theorie des Einphasenmotors. — Nutzen der Selbstinduktion. — Diagramm für das Drehungsmoment. — Praktische Beispiele. — Vorrichtungen zum Angehen.

Die im vorhergehenden Kapitel beschriebenen Mehrphasenmotoren haben den Nachtheil, dass sie drei oder vier Leitungen benöthigen und daher nicht ohne weiteres in gewöhnlichen Wechselstromanlagen zu verwenden sind, die Beleuchtungszwecken dienen. Anderseits macht es Schwierigkeiten, Mehrphasenanlagen gleichzeitig für Licht und Kraft in Anspruch zu nehmen, da dann in Folge der ungleichen Belastung der Zweige leicht Betriebsstörungen auftreten. Die hier vorhandene Lücke füllt der *asynchrone Einphasenmotor* aus, der dem Drehstrommotor sehr nahe steht und die Möglichkeit bietet, aus Wechselstrom-Lichtanlagen gleichzeitig auch Kleinmotoren zu betreiben. Wir wollen uns im Folgenden mit seiner Theorie beschäftigen.

Bringt man in ein oscillirendes Feld, das ein einphasiger Wechselstrom erzeugt, einen Anker mit kurzgeschlossener Wicklung, so bleibt er in Ruhe, so lange er sich selbst überlassen ist. Versetzt man ihn jedoch durch eine äussere Kraft in immer schnellere Drehung, so läuft er von einem bestimmten Augenblicke an von selbst; die Geschwindigkeit steigt dabei noch allmählich an, bis der Synchronismus nahezu erreicht ist. Die Maschine kann alsdann belastet werden und läuft ohne Störung als Motor weiter. Diese Erscheinung, dass der einmal in Gang gesetzte Anker ein Drehungsmoment im Sinne der Bewegung ausübt, lässt sich auf folgende Weise erklären.

Die Kraftlinien des oscillirenden Feldes mögen vertikal verlaufen, und eine bestimmte Windung des Ankers, die eine Fläche Q einschliesst, bilde zu einer gewissen Zeit mit der Richtung der Kraftlinien den Winkel β. Bezeichnet alsdann B die maximale Induktion, so wird zur Zeit t ein Induktionsfluss von der Stärke $BQ \sin\alpha \sin\beta$ die Windungsfläche durchsetzen, wenn man den Ausdruck $2\pi N t$ mit α bezeichnet. Die elektromotorische Kraft, die in Folge dessen in der Windung entsteht, ist gleich $2\pi NBQ \sin\beta \cos\alpha \times 10^{-8}$ Volt; sie erzeugt einen Strom, dessen Stärke von dem Widerstande und der Selbstinduktion der Spule abhängt. Nehmen wir zunächst an, die Windung besitze keine Selbstinduktion, sondern nur Widerstand, so hat der Strom dieselbe Phase, wie die elektromotorische Kraft; in dem Vektordiagramm (Fig. 114) steht der Radius Vektor der

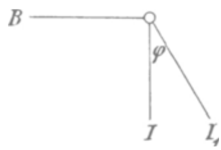


Fig. 114.

Stromstärke OI also senkrecht auf dem Radius der Induktion OB. Das Maximum der Stromstärke beträgt dabei

$$J = \frac{2\pi NBQ \sin\beta \times 10^{-8}}{\varrho} \text{ Ampère,}$$

wo ϱ den Leitungswiderstand der Spule bezeichnet. Nun erzeugt die Wechselwirkung zwischen dem Strome und dem Felde horizontale Zugkräfte, die abwechselnd nach rechts und nach links wirken, und es handelt sich zunächst darum, ob das Integral dieser Kräfte, das sich über die Dauer einer vollen Periode erstreckt, ein Drehungsmoment darstellt. Zur Zeit $t = \frac{\alpha}{2\pi N}$ wäre das Drehungsmoment augenscheinlich dem Ausdruck $JB \sin\alpha \cos\alpha$ proportional, sodass der Mittelwerth seiner Wirkung während einer vollen Periode dem Integral

$$N \int_0^{2\pi} \sin\alpha \cos\alpha \, d\alpha$$

proportional ist. Da aber dieser Ausdruck Null ist, so müsste der Anker in Ruhe bleiben.

Das Ergebnis steht jedoch mit der Erfahrung im Widerspruch. Denn bringen wir eine Spule in eine geneigte Lage zu den Kraftlinien eines oscillirenden Feldes, so stellt sie sich bekanntlich zu den Kraftlinien parallel. Dieser Unterschied zwischen unserer Theorie und der Erfahrung rührt von der Annahme her, dass die Spule keine Selbstinduktion besitzen soll. Lassen wir diese Voraussetzung fallen, so erfährt der Strom in Folge der Selbstinduktion eine Phasenverzögerung, und der Radius Vektor OI der Stromstärke (Fig. 114) steht nicht rechtwinklig auf OB, sondern bleibt hinter dem der elektromotorischen Kraft um den Winkel φ zurück; er fällt also nach $O\,I_1$. Das Drehungsmoment zur Zeit t ist daher nicht mehr dem Ausdruck $\sin\alpha \cos\alpha$, sondern der Grösse $\sin\alpha\cos(\varphi-\alpha)$ pro-

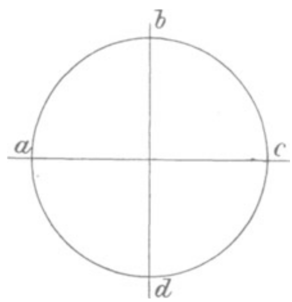


Fig. 115.

portional. Der Mittelwerth seiner Wirkung während einer vollen Periode ist daher

$$N\int_0^{2\pi} \sin\alpha\cos(\varphi-\alpha)\,d\alpha = \pi\,N\sin\varphi$$

proportional. Es wirkt also ein Drehungsmoment auf die Spule, deren Windungsfläche sich in Folge dessen in die Richtung des Feldes einzustellen sucht.

Man sieht leicht, dass dies Drehungsmoment bei einem wirklichen Anker, dessen gesammte Oberfläche mit Spulen bedeckt ist, auf der einen Hälfte nach rechts und auf der andern nach links zu drehen sucht; es übt also keine Wirkung aus, so lange der Anker in Ruhe bleibt. Ist der Widerstand der Ankerwicklung klein, ihre Selbstinduktion dagegen ziemlich gross, so bildet φ offenbar nahezu einen rechten Winkel; das Maximum des Ankerstroms tritt daher ganz kurze Zeit vor dem Maximum der Feldstärke auf, und sämmtliche stromdurchflossene Leiter des Ankers wirken dem Felde entgegen, das sie erzeugt. In Fig. 115 möge der Kreis einen Querschnitt durch die Ankerleiter bedeuten, die der Einfachheit halber als eine zusammenhängende Kupferschicht gezeichnet sind. In dem Augenblicke, wo die Feldstärke ihr Maximum erreicht und senkrecht nach unten gerichtet ist, wird in allen Leitern auf der rechten Seite des vertikalen Durchmessers ein nach unten gerichteter Strom und in allen Leitern auf der linken Seite ein nach oben gerichteter Strom fliessen. Die Wechselwirkung zwischen diesen Strömen und dem Felde ist die folgende: Der Quadrant *a b* sucht den Anker im Sinne des Uhrzeigers zu drehen, der Quadrant *b c* jedoch im entgegengesetzten

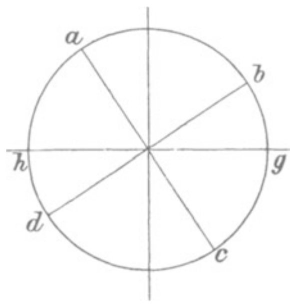


Fig. 115 a.

Sinne. In der untern Hälfte wirkt der Quadrant *cd* im gleichen, der Quadrant *da* im entgegengesetzten Sinne wie der Uhrzeiger. Der Anker wird daher unter diesen Umständen in Ruhe bleiben.

Wir wollen nun annehmen, dass der Anker durch eine äussere Kraft in Bewegung gesetzt wird. Wäre keine Selbstinduktion vorhanden, so würden nicht nur die Ströme ihren höchsten Werth zu derselben Zeit erreichen, wo das Feld durch Null geht, und somit jeder Quadrant für sich keine Wirkung ausüben, sondern es würden auch die Ströme symmetrisch zum vertikalen Durchmesser *b d* vertheilt sein, wie schnell der Anker auch gedreht wird. Die Selbstinduktion hebt jedoch diese symmetrische Vertheilung auf. Es vergeht eine gewisse Zeit zwischen dem Moment, wo die inducirte elektromotorische Kraft ihren höchsten Werth erreicht, und dem Moment, wo der Strom seine grösste Stärke gewinnt. In dem Augenblick, wo das Feld durch Null geht, hat die elektromotorische Kraft ihren höchsten Werth, die Stromstärke wird jedoch beinahe ein Viertel der Periode später ihr Maximum erreichen. Nehmen wir an, in Fig. 115

sei die Feldstärke eben durch Null gegangen und wachse in der Richtung nach unten, dann wirkt die elektromotorische Kraft in den Quadranten *bc* und *cd* nach unten und in den Quadranten *da* und *ab* nach oben. Die entsprechenden Stromstärken treten erst nach einiger Zeit auf, in der sich der Anker um einen bestimmten Winkel gedreht hat. Er ist dadurch in die Stellung gekommen, die Fig. 115a angiebt. Während dieser Zeit hat auch das nach unten gerichtete Feld beinahe seine höchste Stärke angenommen; gleichzeitig haben auch die Ströme ihre höchste Stärke und fliessen in den Leitern *bcd* nach unten und in den Leitern *dab* nach oben. Das Drehungsmoment, das diese Ströme hervorrufen, wirkt augenscheinlich im Sinne des Uhrzeigers in den Zonen *hab* und *gcd* und im entgegengesetzten Sinne in den Zonen *dh* und *bg*. Die erstere Wirkung überwiegt und nimmt bei geringer Geschwindigkeit, wie z. B. beim Angehen, mit dieser zu. Die Anfangsgeschwindigkeit muss daher einen bestimmten Werth erreichen, bis das resultirende Drehungsmoment gross genug ist, um die Reibung in den Lagern und andere Widerstände zu überwinden, die der Drehung entgegenwirken. Ist dieser Werth überschritten, so wächst das Drehungsmoment, und die Geschwindigkeit steigert sich soweit, dass der Synchronismus nahezu erreicht wird.

Diese Erklärung des Ganges eines einphasigen Motors macht keinen Anspruch auf Vollständigkeit oder wissenschaftliche Genauigkeit. Sie soll nur im Allgemeinen zeigen, wie ein solcher Motor überhaupt Arbeit leisten kann; ferner lag uns besonders daran, hervorzuheben, dass die Selbstinduktion des Ankers hierbei eine wesentliche Rolle spielt.

Zu denselben Schlussfolgerungen gelangt Ferraris, der davon ausgeht, dass die magnetischen Felder Vektorgrössen sind, die sich in ähnlicher Weise wie Kräfte zu einem Parallelogramm zusammensetzen lassen. Ein oscillirendes Feld kann daher als die Resultante zweier gleicher konstanter Felder aufgefasst werden, die sich in entgegengesetzter Richtung genau so oft umdrehen, wie das oscillirende Feld seine Richtung ändert. Ein oscillirendes Feld, das sich mit der Periodenzahl 50 zwischen den Werthen $F = 100000$ und $F = -100000$ Einheiten bewegt, kann also durch zwei konstante Felder von 50000 Einheiten ersetzt werden, die sich mit der Periodenzahl 50 im entgegengesetzten Sinne drehen. Das Feld I möge sich nun im Sinne des Uhrzeigers, das Feld II im entgegengesetzten Sinne drehen, und der Anker, auf den eine äussere Kraft wirken soll, beschreibe 50 Umdrehungen in der Sekunde im Sinne des Uhrzeigers. Die Ankerleiter sind dann gegen das Feld I in Ruhe, und da dies eine konstante Stärke besitzt, so findet keine inducirende Wirkung zwischen ihm und dem Anker statt. Das Feld II macht gegen den Anker 100 Umdrehungen in der Sekunde und wirkt auf ihn gerade so, wie ein rotirendes Feld von 50000 Einheiten und 100 Umdrehungen auf einen feststehenden Anker. Lassen wir den Anker 48 Umdrehungen beschreiben, so bewegt sich das Feld I mit 2 Umdrehungen und das Feld II mit 98 Umdrehungen gegen ihn. Nun wirken beide Felder inducirend auf den Anker, und der Strom in einem beliebigen Ankerleiter kann aus zwei Strömen zusammengesetzt gedacht werden, von denen der eine durch das Feld I und der andere durch Feld II inducirt wird. Betrachtet man jedes Feld und die von ihm inducirten Ströme für sich, so arbeitet die Maschine wie zwei mit einander vereinigte Drehstrommotoren, die bei der Periodenzahl von 100 in der Sekunde 2 und 98 Umdrehungen in der Sekunde machen. Es ist jedoch auf den ersten Blick nicht klar, ob man das von jedem Felde ausgeübte Drehungsmoment so bestimmen darf, als wenn es allein wirkte. Es ist vielmehr fraglich, ob wir zu der Annahme berechtigt sind, dass beim Entstehen des Drehungsmoments der Ankerstrom, der durch das Feld I erzeugt ist, allein auf dies Feld und nicht auch auf das andere Feld wirkt. Die folgende Ueberlegung zeigt, dass dies in der That der Fall ist. Die Periodenzahl des Stromes, der in einem beliebigen Ankerleiter durch das Feld I erzeugt wird, ist gleich 2, während derselbe Ankerleiter das Feld II mit der Periodenzahl 98 durchschneidet. Bezeichnen wir das Verhältnis dieser beiden Zahlen allgemein mit m, so ist der momentane Werth der Kraft, welche von der Wechselwirkung zwischen dem Feld II und dem durch das Feld I erzeugten Strom herrührt, durch einen Ausdruck von der Form

$$K \sin(m\alpha) \sin\alpha$$

gegeben, wo K eine Konstante ist und der Winkel α sich auf die längere der beiden Perioden bezieht. Um die wirklich auftretende mechanische Kraft zu finden, müssen wir diesen Ausdruck über eine oder über mehrere Perioden integriren. Die Integration über eine Periode liefert

$$N\int_0^{2\pi} K \sin (m\alpha) \sin \alpha \, d\alpha$$

$$= NK\left[\frac{\sin[(m-1)\alpha]}{2(m-1)} - \frac{\sin[(m+1)\alpha]}{2(m+1)}\right]_0^{2\pi}.$$

Ist m eine ganze Zahl, so wird dieser Ausdruck Null. Also übt das eine Feld in dem Falle, wo $m = 49$ ist, keine Wirkung auf den durch das andere Feld inducirten Strom aus. Dasselbe findet statt, wenn der Anker 46 Umdrehungen in der Sekunde macht und die Periodenzahlen 4 und 96 betragen; m wäre dann $96/4 = 24$. Für die dazwischen liegende Ankergeschwindigkeit von 47 Umdrehungen wird jedoch $m = 97/3$, also eine gebrochene Zahl; dann hat der obige Ausdruck einen bestimmten, jedoch augenscheinlich sehr kleinen Werth, der positiv oder negativ sein kann. Diese Betrachtungen gelten auch noch, wenn die Integration nicht auf die Dauer einer Periode beschränkt bleibt, sondern über mehrere Perioden ausgedehnt wird. Denn die lebendige Kraft des rotirenden Ankers ist sehr gross im Verhältnis zu der Energie, die von jener kleinen Kraft erzeugt wird, die anfangs während der Dauer einiger Perioden in der Richtung der Bewegung, darauf aber ebenso lange Zeit im entgegengesetzten Sinne wirkt. Erstreckt man also das Integral über eine hinreichend grosse Anzahl von Perioden, so ist es stets gleich Null. Um das wirklich auftretende Drehungsmoment für verschiedene Geschwindigkeiten zu ermitteln, können wir daher die beiden Kurven für das Drehungsmoment vereinigen, die sich bei Betrachtung jedes Feldes für sich ergeben würden.

In Fig. 116 möge A_1 die Kurve für das vom Felde F_1 herrührende Drehungsmoment darstellen, das sich mit einer Geschwindigkeit von 100 Umdrehungen im Sinne des Uhrzeigers gegen den Anker dreht. Die Länge $O_2 O_1$ stellt dann 100 Umdrehungen dar; die relative Geschwindigkeit des Ankers zum Felde I würde daher von O_2 nach links und seine absolute Geschwindigkeit im Raume von O nach links zu rechnen sein. Ist die absolute Geschwindigkeit des Ankers OS, so wird seine relative Geschwindigkeit gegen das Feld I durch $O_2 S$ dargestellt. Das Drehungsmoment, das dies Feld auf den Anker ausübt, ist dann gleich ST_1; es wirkt im Sinne der Ankerbewegung und ist daher positiv in Rechnung zu setzen. Die relative Geschwindigkeit des Ankers gegen das Feld II wird dementsprechend $OO_1 - OS = SO_1$, und das von diesem Feld ausgeübte

Drehungsmoment ist durch die Strecke ST_2 darzustellen. Es wirkt der Bewegung entgegen und ist daher negativ. Die Differenz dieser beiden Komponenten liefert die Resultante des Drehungsmoments

$$ST = ST_1 - ST_2.$$

Bestimmen wir diese Resultante für verschiedene Geschwindigkeiten OS, so erhalten wir die Kurve A. Diese schneidet die Abscissenachse einmal für die Geschwindigkeit Null, d. h. wenn der Anker in Ruhe ist, sodann für eine Geschwindigkeit, die nahezu dem synchronen Gang des Motors entspricht. Zwischen diesen beiden Werthen ist das Drehungsmoment positiv und erreicht ein Maximum. Der Gang des Motors ist für solche Geschwindigkeiten stabil, welche jenseits des Werthes für das maximale Drehungsmoment liegen, aber

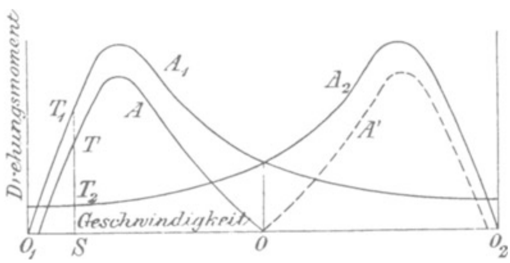


Fig. 116.

nicht mehr für niedrigere Geschwindigkeiten. Die Richtung, in der der Motor läuft, ist hierbei ohne Einfluss. Wir nahmen hierbei an, dass sich der Motor im Sinne des Uhrzeigers drehe, und fanden die Kurve A. Hätten wir ihn in entgegengesetzter Richtung in Gang gesetzt, so würde sein Drehungsmoment durch die Kurve A' darzustellen sein, die symmetrisch zur Kurve A rechts von O liegt.

Es ist natürlich vortheilhaft, den Motor so zu konstruiren, dass die Ordinaten der Kurve A gross ausfallen; es ist dies der Fall, wenn sich die Kurve A_1 auf ihrer linken Hälfte hoch erhebt, aber auf ihrem rechten Ende tief verläuft. Hierzu muss der Motor eine beträchtliche Selbstinduktion besitzen; denn man sieht leicht, dass ein Motor ohne Selbstinduktion, wie wir oben unsern idealen Motor voraussetzten, für Einphasenströme nicht brauchbar ist. Liesse sich ein solcher Motor überhaupt herstellen, so würde die Kurve für das Drehungsmoment bei ihm nicht so verlaufen, wie es Fig. 116 angiebt. Der Theil A_1 wäre eine Gerade, die von O_1 nach rechts anstiege, während das Stück A_2 symmetrisch zu A_1 von O_2 aus nach links unten verliefe. Die Kurven für das resultirende Drehungsmoment würden also auch durch gerade Linien dargestellt, die von O nach beiden Seiten abwärts liefen; ihre Ordinaten wären also negativ. Ein solcher Motor ohne Selbstinduktion würde nicht nur nicht von selbst angehen, sondern sogar einer äussern Kraft, mittels der er in Gang gebracht werden sollte, Widerstand entgegensetzen. Er wäre daher völlig unbrauchbar für Einphasenströme, obwohl er für Mehrphasenströme eine vollendete Maschine abgiebt. In der Praxis ist dieser Grad der Vollendung freilich nicht zu erreichen, weil die Selbstinduktion hier nie ganz zu vermeiden ist. Für Mehrphasenmotoren ist die Eigenschaft aber immer nachtheilig, während sie bei Einphasenmotoren ganz unentbehrlich ist.

Im vorigen Kapitel haben wir gezeigt, wie sich die Selbstinduktion oder die magnetische Streuung bei einem Mehrphasenmotor experimentell bestimmen lässt; im Anschluss daran haben wir die Resultate mitgetheilt, welche Kolben durch Versuche an einem solchen Motor gefunden hatte. Derselbe Motor wurde auch auf Streuung untersucht, während er durch einen Einphasenstrom gespeist wurde, der seine sämmtlichen 36 Feldmagnetspulen in Hintereinanderschaltung durchfloss, sodass 252 Windungen für den Feldmagnet in Rechnung zu setzen sind. Die Untersuchung lieferte folgende Ergebnisse.

Die Periodenzahl des zugeführten Stromes betrug 50, seine Spannung 180 V, seine Stärke 18,8 A und der Effektverbrauch 432 Watt. Die elektromotorische Kraft, welche in der Ankerspule von 60 Windungen inducirt wurde, hatte für bestimmte Stellungen des Ankers einen maximalen Werth von 54 V, an andern Stellungen war sie kleiner und nahm bis Null ab. Die Kurve der elektromotorischen Kraft war nahezu sinusförmig, sodass die mittlere elektromotorische Kraft zu $54 : \frac{\pi}{2} = 34{,}4$ V anzunehmen ist. Als Streuungsfaktor ergiebt sich daher $\frac{34{,}4}{60} : \frac{180}{252} = 0{,}800$. Bei schwacher Belastung gehen also von 1000 Kraftlinien, die durch die Feldmagnete verlaufen, 200 durch Streuung verloren; die übrigen 800 durchsetzen den Anker. Bei zunehmender Belastung würde sich die Zahl der letztern noch weiter vermindern, wie wir im vorigen Kapitel zeigten. In der folgenden Tabelle sind die Ergebnisse von Bremsversuchen aufgeführt, die Kolben an einem 3pferdigen Einphasenmotor der Maschinenfabrik Oerlikon bei der Periodenzahl 50 anstellte. Vergleicht man die folgende Tabelle mit den früher mitgetheilten Zahlen, die sich auf Dreiphasenmotoren beziehen, so erkennt man, dass bei den Einphasenmotoren der Leistungsfaktor niedriger und die Schlüpfung kleiner ist.

Am Bremszaum gemessene Leistung in P	Watt	Strom in der Magnetwicklung Stärke in Ampère	Spannung in Volt	Effektaufnahme in Watt als Produkt aus Spannung und Stromstärke	mit dem Leistungsmesser bestimmt	Leistungsfaktor in Procenten	Schlüpfung in Procenten	Wirkungsgrad in Procenten
3,6	2650	45,0	110	4950	3766	76,0	4,5	70,5
0	0	21,8	112	2440	410	16,8	0	0

Bei grössern Motoren kann der Leistungsfaktor 90 % erreichen und diesen Betrag sogar überschreiten, wie aus der folgenden Tafel hervorgeht; sie enthält die Ergebnisse von 14 Versuchen, die Arno an einem 15pferdigen Brown'schen Einphasenmotor anstellte. Dieser zeichnet sich dadurch aus, dass er überhaupt keine Schleifkontakte besitzt. Der Ankerwiderstand lässt sich daher während des Angehens nicht künstlich vergrössern; um den Motor in Gang zu setzen, muss man deshalb die Stärke des zugeführten Stromes entsprechend

Umdrehungszahl	Leistung am Bremszaum in Watt	Strom in der Magnetwicklung Stärke in Ampère	Spannung in Volt	Effektaufnahme in Watt als Produkt aus Spannung und Stromstärke	mit dem Leistungsmesser bestimmt	Leistungsfaktor in Procenten	Wirkungsgrad in Procenten
0	0	150	132	19 800	17 595	89	0
876	0	27	157	4 252	688	16	0
862	574	27	156	4 303	1 173	27	49
863	1 934	31	155	4 774	2 652	56	73
866	2 870	36	157	5 630	3 774	67	76
868	4 136	42	156	6 520	5 176	79	80
863	5 085	47	154	7 307	6 171	84	82
862	5 652	51	154	7 792	6 732	86	84
859	6 940	57	152	8 694	7 854	90	88
858	7 728	64	151	9 634	8 823	92	88
856	9 980	82	149	12 218	11 398	93	88
851	11 385	102	146	14 943	13 923	93	82
812	11 866	118	143	16 903	15 478	92	77
816	12 320	128	144	18 432	16 626	90	74

steigern, wie aus der ersten Reihe der Tabelle hervorgeht. Wir werden weiter unten darauf zurückkommen, wie man solche Motoren dazu bringen kann, dass sie von selbst angehen. Der fragliche Motor ist für Ströme von der Periodenzahl 40 gebaut; da er 6 Pole besitzt, so sollte seine Geschwindigkeit etwas unter 800 Umdrehungen in der Minute liegen. Während der Versuche war die Periodenzahl des zugeführten Stromes höher als 40, und dementsprechend war die Umdrehungszahl, selbst bei Belastung, grösser als 800. Die Spannung des zugeführten Stromes betrug 150 V. Während des Versuchs war der Motor durch einen Bremszaum belastet, und alle elektrischen Messungen wurden mit sorgfältig geaichten Instrumenten vorgenommen.

Wir kommen nun zum Schluss noch darauf zu sprechen, wie die Einphasenmotoren in Gang gesetzt werden. Bei kleinern Maschinen genügt ein fester Zug am Riemen, um dem Anker eine solche Geschwindigkeit zu geben, dass er den Reibungswiderstand beim Leerlauf überwindet. Kleine Motoren können daher mit der Hand in Gang gesetzt werden, wenn auf der Achse, der die Kraft des Motors zugeführt wird, eine Leerlaufs- und eine Arbeitsscheibe angebracht ist. Grosse Motoren sind indessen zu schwer für diese Methode und erfordern deshalb besondere Vorrichtungen zum Angehen, von denen es eine grosse Anzahl verschiedener Art giebt. Alle beruhen darauf, dass der zugeführte Einphasenstrom in zwei Komponenten von verschiedener Phase *gespalten* wird. Die Feldmagnete sind mit zwei Sätzen Spulen versehen, die so mit den beiden Zweigen verbunden sind, dass sie ein wirkliches Drehfeld erzeugen würden, wenn der Phasenunterschied zwischen den beiden Strömen 90^0 betrüge. Ist der Phasenunterschied geringer, so entsteht noch immer ein Drehfeld von wechselnder Stärke, das jedoch hinreicht, um den Motor in Gang zu setzen. Hat der Motor eine bestimmte Geschwindigkeit erlangt, so schaltet man die Anlassvorrichtung aus und ändert die Verbindungen zwischen den Spulen, so dass sie nur einen Stromkreis bilden, der ein oscilirendes Feld erzeugt. Der Motor nimmt dann schnell eine solche Geschwindigkeit an, dass er nahezu synchron läuft, worauf er belastet werden kann. Die Phasendifferenz zwischen den beiden Strömen kann dadurch erzeugt werden, dass man in einen Zweig Widerstand und in den andern Selbstinduktion einschaltet. Da der eine Zweig durch die Feldmagnetwicklung von vornherein Selbstinduktion besitzt, so genügt es auch, in den andern einen Kondensator einzufügen, um die nöthige Phasendifferenz hervorzubringen.

Diese Anordnung benutzt Brown in seinem Einschalter, der in Fig. 117 abgebildet worden ist. Er verwendet einen Flüssigkeitskondensator von aussergewöhnlich hoher Kapacität. Da jedoch die Spannung zwischen zwei benachbarten Platten des Kondensators nicht zu hoch sein darf, so sind mehrere schüsselförmige Platten

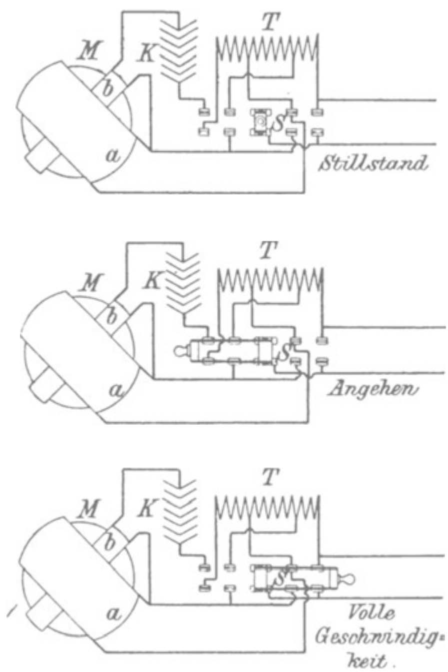


Fig. 117.

hintereinander geschaltet, von denen die erste und letzte mit dem Stromkreis verbunden ist. Weil beim Angehen in allen Fällen ein hoher Strom von niedriger Spannung erforderlich ist, so verbindet Brown mit dem Kondensator einen Transformator, so dass nur ein schwacher Strom bei der normalen Spannung zugeführt zu werden braucht, während der Motor einen starken Strom von niedriger Spannung erhält. Die nöthigen Umschaltungen vom Stillstand zum Angehen und zur vollen Geschwindigkeit werden sämmtlich mit einem Hebel vorgenommen, wie es Fig. 117 zeigt. *M* bedeutet hier den Motor, *K* den Kondensator, *T* den Transformator und *S* den Umschalter. Die Leitungen an der rechten Seite führen den Strom zu; die übrigen Leitungen dienen als Verbindungen zwischen dem Motor und dem Umschalter. Die Wicklung des Motors besteht aus zwei Spulen *a* und *b*: letztere ist eine Hülfsspule aus dünnerm Draht, die nur während des Angehens in den Kreis des Kondensators eingeschaltet wird. Der Strom dieser Spule eilt dem Strom in Spule *a* fast um ein Viertel der Periode voraus und erzeugt so ein Drehfeld. Beim Einschalten ist der Hebel nach links hinübergelegt. Liegt er auf der rechten Seite, so ist die Spule *a* direkt mit den Zuleitungen verbunden, und die Spule *b* ist sammt der ganzen Anlassvorrichtung ausgeschaltet.

Wie man sieht, sind ziemlich verwickelte Vorrichtungen erforderlich, um den Motor in Gang zu setzen, ohne dass er dabei eine erhebliche Zugkraft entwickeln kann. Von diesem Gesichtspunkte aus bedeutet der in allerjüngster Zeit bekannt gewordene Heyland'sche Motor[1]) einen erheblichen Fortschritt.

Heyland bringt, ebenso wie oben beschrieben, auf dem Magnetringe zwei auf einander senkrechte Wicklungen an, die in Parallelschaltung zwischen den Speiseleitungen liegen. Die Hauptwicklung ist, wie üblich, in Nuthen über den ganzen Umfang des Ringes vertheilt, die Hilfswicklung zählt nur wenige Windungen, die für den Fall eines vierpoligen Motors in vier um 90^0 von einander abstehenden Nuthen koncentrirt sind. Das Feld der Hilfswicklung besitzt in Folge dieser Anordnung eine starke Streuung, die ihrerseits eine beträchtliche Phasenverschiebung des Hilfsstromes bewirkt. Dieser erzeugt also senkrecht zum Hauptfelde ein in der Phase verschobenes Hilfsfeld, das um so kräftiger ausfällt, je weniger Windungen die Hilfsspule zählt. Es ist somit die Möglichkeit gegeben, dass der Motor ohne weitere Hilfsvorrichtung mit starker Zugkraft anläuft.

Ein derartiger vierpoliger Motor ist von Professor Kittler eingehend untersucht. Er lieferte normal 4 P und verbrauchte 43 A und 120 V bei einer Periodenzahl von 50. Die Schlüpfung betrug 6 %, der Leistungsfaktor 0,77 und der Wirkungsgrad 74 %. Seine Anzugskraft konnte bis auf 10 P gesteigert werden, wobei allerdings die Stromstärke auf etwa 230 A stieg und der Leistungsfaktor auf 0,54 sank.

---

[1]) Elektr. Zschr. 1897, S. 480 u. 523.

Elftes Kapitel.

Die Leitung. — Beziehung zwischen Anlagekapital und Energieverlust. — Günstigste Betriebsbedingungen. — Beziehung zwischen Kupfergewicht einerseits und zwischen Leistung, Entfernung, Spannung und Wirkungsgrad anderseits. — Phasenregler. — Kupfergewicht bei verschiedenen Uebertragungssystemen. — Leitungsmaterial. — Spannung und Durchhang der Leitungen. — Isolatoren. — Verbindungen. — Blitzableiter.

Bei jedem ausgedehntern System der elektrischen Kraftübertragung bildet die Leitung einen wesentlichen Faktor, der sowohl auf die Anlage-, als auch auf die Betriebskosten einen grossen Einfluss ausübt.

Wir haben hierbei zwei Fälle zu unterscheiden: in dem einen wird die Energie von einer Centralstation nach einer grossen Zahl von Arbeitsplätzen durch ein ausgebreitetes Leitungsnetz übertragen, während im andern Falle die gesammte Energie durch ein Paar Leiter ohne weitere Verzweigung nach einer einzigen Empfangsstation geleitet wird. Ein Beispiel für die erste Art der Kraftübertragung bietet eine elektrische Centrale, die die Lampen und Motoren einer Stadt mit Strom versorgt; das zweite System kommt dagegen zur Anwendung, wenn die Energie von einem abgelegenen Orte auf beträchtliche Entfernung nach einem Platze zu übertragen ist, wo man sie mit grösserm Vortheil benutzen kann. In beiden Fällen unterliegen jedoch die Anlagekosten für die Leitungen und die laufenden Ausgaben für die Energie, die als Wärme in der Leitung verloren geht, gewissen Bedingungen, die einander widersprechen. Denn um an Energie zu sparen, muss man Leiter von niedrigem Widerstand, also von grossem Querschnitt verwenden. Hierdurch werden aber die Anlagekosten sehr gross; denn diese wachsen mit dem Querschnitt der Leiter. Bei jedem System der elektrischen Kraftübertragung muss es daher wenigstens einen besondern Leitungsquerschnitt geben, für den die Summe der Zinsen der Anlagekosten und der jährlichen Kosten des Energieverlustes ein Minimum wird. Dieser Querschnitt muss daher gewählt werden, da er auf die Dauer der billigste ist.

Die Bestimmung dieses günstigsten Leitungsquerschnittes ist etwas verwickelt und muss für jeden einzelnen Fall besonders durchgeführt werden. Dabei ist Folgendes zu berücksichtigen: 1. der Zinsfuss, der für das Anlagekapital anzusetzen ist; 2. die Kosten einer Pferdekraftstunde an den Klemmen des Motors; 3. die Zahl der Stunden im Jahre, in denen die Energie zu liefern ist; 4. die Kosten der Gewichtseinheit des Leitungsmaterials; 5. die Kosten der Isolation; 6. die Kosten der Träger bei einer oberirdischen oder die der Gräben für eine unterirdische Leitung; 7. die Kosten der Arbeit für Verlegung.

Wenn es erlaubt ist, das Anlagekapital dem Gesammtgewicht des Leitungsmaterials proportional zu setzen, so gilt für eine gegebene Leitung die Beziehung

$$p K = c q p,$$

wo K die Gesammtkosten der Leitung, q ihren Querschnitt, p den jährlichen Zinsfuss und c eine Konstante bezeichnet. Nun ist der Widerstand der Leitung ihrem Querschnitt q umgekehrt proportional, und der Energieverlust ist gleich diesem Widerstande multiplicirt mit dem Quadrat der Stromstärke. Bezeichnet k die Kosten einer Pferdekraftstunde an den Klemmen der Dynamomaschine und t die Zahl der Stunden im Jahre, während der der Strom i fliesst — es soll immer der volle Strom geliefert werden —, dann sind die jährlichen Kosten für den Energieverlust

$$V = \frac{a}{q} k t i^2,$$

wo a eine Konstante bezeichnet. Die Gesammtkosten des Betriebes werden ein Minimum sein, wenn

$$\frac{d K p}{d q} + \frac{d V}{d q} = 0$$

ist. Dies ergiebt

$$c p = \frac{a k t i^2}{q^2},$$

also

$$q = i\sqrt{\frac{a k t}{c p}}.$$

Setzen wir diesen Werth in die Gleichungen für K und V ein, so finden wir

$$p K = i\sqrt{a k t c p}$$

und

$$V = i\sqrt{a k t c p}.$$

Folglich ist

$$p K = V,$$

d. h. für den günstigsten Leistungsquerschnitt sind die jährlichen Zinsen des Anlagekapitals gleich den jährlichen Kosten des Energieverlustes. Dieses Gesetz wird gewöhnlich nach Lord Kelvin (William Thomson) benannt, der eine darauf bezügliche Abhandlung „Die Oekonomie der metallischen Leiter für Elektricität“ der British Association im Jahre 1881 vorlegte. Es ist zu beachten, dass dies Gesetz in der gegebenen Form nur auf solche Fälle angewandt werden kann, in denen die Kapitalanlage dem Gewichte des Leitungsmaterials proportional ist. In der Praxis findet dies jedoch nur selten statt. Handelt es sich z. B. um ein in die Erde verlegtes Kabel, so werden die Kosten für das Ziehen und Wiederausfüllen der Gräben für verschiedene Querschnitte des Kabels dieselben sein; auch sind andere hierher gehörige Nebenumstände, z. B. die Isolirung, nicht in demselben Maasse vom Querschnitt abhängig, als es in der Formel angenommen wird. Ferner kann sich bei oberirdischen Leitungen die Drahtdicke in ziemlich weiten Grenzen verändern, ohne dass die Zahl der Träger zu wachsen braucht, und es ist auch hier ein gewisser Theil des Anlagekapitals vom Querschnitt der Leitungen unabhängig. Man schreibt deshalb richtiger

$$K = K_0 + k q,$$

wo K_0 den konstanten und vom Leitungsquerschnitt unabhängigen Theil des Anlagekapitals bezeichnet. Dieses neue Glied auf der rechten Seite der Formel ändert an der Differentialgleichung nichts, da $\frac{d K_0}{d q} = 0$ ist. Wir erhalten deshalb wiederum

$$q = i\sqrt{\frac{a k t}{p c}}.$$

Verändert wird jedoch der Werth von pK, wir haben

$$pK = pK_0 + i\sqrt{a k t c p},$$

es bleibt dagegen

$$V = i\sqrt{a k t c p}.$$

Die jährlichen Zinsen des Anlagekapitals und die jährlichen Kosten des Energieverlustes stehen nun in folgender Beziehung

$$pK = pK_0 + V.$$

Schreiben wir diese Gleichung in der Form

$$p(K - K_0) = V,$$

so finden wir als günstigsten Leitungsquerschnitt denjenigen, für den die jährlichen Kosten des Energieverlustes gleich den jährlichen Zinsen für den Theil des Anlagekapitals sind, der dem Gewichte des verwendeten Leitungsmaterials proportional zu setzen ist.

Haben wir den Gegenstand bisher rein theoretisch betrachtet, so wollen wir jetzt sehen, wie sich diese Ergebnisse für die Praxis verwerthen lassen. Wir können die Schlüsse, zu denen wir gelangt sind, natürlich nicht ohne Weiteres auf eine Kraftübertragungsanlage anwenden, da wir verschiedene wichtige Voraussetzungen noch nicht berücksichtigt haben. Dass eine unterschiedslose Anwendung des Gesetzes vom günstigsten Querschnitte sogar zu falschen Schlüssen führen kann, wird sofort klar, wenn man bedenkt, dass der Leitungsquerschnitt nach dem Gesetz nur von der Stromstärke und nicht auch von der Spannung oder von der Leitungslänge abhängig ist. Wäre das Gesetz, wie es oben aufgestellt wurde, allgemein gültig, so müsste es auch dann richtig sein, wenn die Spannung niedrig und die Entfernung gross ist. Unter solchen Umständen kann man aber einen Querschnitt bekommen, bei dem die ganze verfügbare Spannung zur Ueberwindung des Leitungswiderstandes verbraucht wird, sodass überhaupt keine Energie an der Empfangsstation übrig bleibt. Dass man zu einem so absurden Ergebnis gelangt, liegt nicht an der falschen Formulirung des Gesetzes, sondern nur an der falschen Anwendung desselben. Nach dem Gesetze giebt es für jede Stromstärke einen bestimmten Querschnitt, für den die jährlichen Kosten, um diesen Strom durch die Leitungen zu senden, am geringsten sind; das Gesetz sagt aber nicht, dass die an der Endstation verfügbare Energie am grössten ist, wenn diese Kosten am niedrigsten sind.

Dem Gesetze liegt auch die Annahme zu Grunde, dass die Energie längs der gesammten Leitung den gleichen Geldwerth hat. Dies trifft natürlich nicht zu. Denn hätte die Energie an der Erzeugungs- und an der Empfangsstation den gleichen Werth, so wäre überhaupt keine Kraftübertragung nöthig. Eine weitere unrichtige Annahme, die dem Gesetze zu Grunde liegt, besteht darin, dass der Geldwerth der elektrischen Energie unabhängig von der Spannung ist, mit der der Strom geliefert wird. Dynamomaschinen für sehr hohe Spannung sind nämlich sowohl in der Anschaffung wie in der Unterhaltung theurer als solche für niedrige Spannung. Man muss daher bei Aufstellung der Bedingungen die Betriebsspannung berücksichtigen, für welche die Leitung am billigsten wird. Wir haben ferner nicht nur die Verzinsung und Amortisation der Leitung in Rechnung zu setzen, sondern haben auch entsprechende Summen für die Maschinen an beiden Enden einzuführen. Das ganze Problem ist, wie aus allem hervorgeht, sehr verwickelt und erfordert nicht nur die Berücksichtigung der Leitung, sondern die der ganzen Anlage.

Um die Betrachtungen möglichst zu vereinfachen, nehmen wir an, die Energie werde mittels Gleichstroms übertragen. Die Bedingungen für Wechsel- und Mehrphasenströme ergeben sich dann leicht, wenn man die Beziehungen aufstellt, welche zwischen dem Kupfergewicht bei Gleichstrom und bei andern elektrischen Energievertheilungssystemen bestehen.

In der Praxis pflegt die Aufgabe gewöhnlich an folgende Bedingungen geknüpft zu sein. Die maximale Spannung an den Klemmen des Generators ist entweder gegeben oder kann unter Berücksichtigung konstruktiver Gründe und der örtlichen Verhältnisse gewählt werden. Die Wirthschaftlichkeit der Anlage hängt gewöhnlich sehr von der Spannung ab; man sollte daher eine Reihe von Entwürfen für verschiedene Spannungen anfertigen und unter ihnen den geeignetsten auswählen. Die jährlichen Kosten einer gebremsten Pferdekraft an der Erzeugungsstation sind bekannt, ebenso die Anzahl der zu übertragenden Pferdekräfte, die Entfernung zwischen den beiden Stationen, sowie die Kosten der Maschinen und Regulirvorrichtungen, die für jede Pferdekraft aufzuwenden sind. Hat man sich darüber entschieden, wie die Leitungen zu führen sind, so kennt man auch die Kosten der Träger für jedes Kilometer und diejenigen der Leiter selbst für jede Tonne Kupfer. Zu berechnen ist der Leiterquerschnitt, der Arbeitsstrom, die an der Primärstation erforderliche Energie, der gesammte Wirkungsgrad, die gesammten Anlagekosten und die jährlichen Kosten der am Motor gebremsten Pferdekraft.

Wir nehmen an, der Generator und der Motor haben einen Wirkungsgrad von 90 % und der Leitungswiderstand betrage für ein Quadratcentimeter Querschnitt und für ein Kilometer Hin- und Rückleitung 0,33 Ohm, und führen die folgenden Bezeichnungen ein:

l Entfernung in Kilometer,
q Leitungsquerschnitt in Quadratcentimeter,
E Klemmenspannung des Generators in Volt,
e Klemmenspannung des Motors in Volt,
P_g Gebremste Leistung der Antriebsmaschine des Generators in Pferdestärken,
P_m Gebremste Leistung des Motors in Pferdestärken,
i Stromstärke in Ampère,
g Kosten der Generatorstation für die abgegebene Pferdekraft in Mark,
m Kosten der Motorstation einschliesslich der Regulirvorrichtung für die gebremste Pferdekraft in Mark,
$G = 0{,}90\, g\, P_g$ Kosten des Generators in Mark,
$M = m\, P_m$ Kosten des Motors einschliesslich der Regulirvorrichtung in Mark,
$t = 1{,}78\, q l$ Kupfergewicht der Leitung in Tonnen,
K Kosten einer Tonne Kupfer einschliesslich der Verlegung in Mark,
k Kosten der Träger der Leitung auf ein Kilometer Länge in Mark,
g' Jährliche Kosten einer dem Generator zugeführten Pferdekraft in Mark,
p Procentsatz der Verzinsung und Amortisation der ganzen Anlage.

Die dem Motor zugeführte Leistung beträgt $\frac{736}{0{,}9} P_m = 820\, P_m$ Watt; in der Leitung werden $Ei - 820\, P_m$ Watt verzehrt. Der Energieverlust in der Leitung wird aber auch durch Multiplikation des Leitungswiderstandes mit dem Quadrat der Stromstärke gefunden. Es muss daher

$$Ei - 820\, P_m = 0{,}33 \frac{l}{q} i^2$$

sein. Hieraus ergiebt sich der Leitungsquerschnitt (in Quadratcentimeter) zu

$$q = \frac{0{,}33\, l\, i^2}{E i - 820\, P_m}.$$

Die Kosten der Leitung und ihrer Verlegung betragen, abgesehen von den Trägern,

$$t\, K = 1{,}78\, q\, l\, K$$

oder, wenn wir für q den eben gefundenen Werth einführen,

$$t\, K = \frac{0{,}59\, l^2\, i^2\, K}{E i - 820\, P_m}.$$

Die Gesammtkosten der Anlage, die zu verzinsen und zu amortisiren sind, setzen sich aus diesem Posten und den folgenden zusammen:

Kosten der Träger für die Leitung $l\, k$,
Kosten der Maschinen in der Motorstation $m\, P_m$,
Kosten der Maschinen in der Generatorstation $g\, \frac{E i}{736}$.

Die gesammten Anlagekosten sind daher

$$A = g\, \frac{E i}{736} + m\, P_m + l k + \frac{0{,}59\, l^2\, i^2\, K}{E i - 820\, P_m},$$

und die jährlichen Kosten der am Motor gebremsten Pferdekraft betragen

$$a = \frac{p\, A + g'\, P_g}{P_m}.$$

Beachten wir, dass

$$0{,}90\, P_g = \frac{E i}{736}, \quad \text{also} \quad P_g = \frac{E i}{660}$$

ist, und setzen wir

$$B = \frac{g\, E}{736}\, p + \frac{E}{660}\, g' \quad \text{und} \quad \gamma = \frac{820\, P_m}{E},$$

so wird

$$a = \frac{B i}{P_m} + m p + \frac{l k p}{P_m} + \frac{0{,}59\, p\, l^2\, K\, i^2}{P_m\, E\, (i - \gamma)}.$$

γ stellt hier diejenige Stromstärke dar, die erforderlich wäre, wenn die Leitung keinen Widerstand besässe. Die günstigste Stromstärke, für die bei einer gegebenen Spannung E die jährlichen Kosten der an der Motorstation verfügbaren Pferdestärke am geringsten sind, ergiebt sich, wenn wir

$$\frac{da}{di} = 0$$

setzen, zu

$$i = \gamma \left(1 + \sqrt{\frac{0{,}59\, p\, l^2\, K}{BE + 0{,}59\, p\, l^2\, K}}\right).$$

Aus dieser Stromstärke berechnet sich die Klemmenspannung des Motors zu

$$e = \frac{830\, P_m}{i}.$$

Dadurch ist weiter der Spannungsverlust $E - e$, der in der Leitung stattfindet, und folglich auch der Widerstand, der Querschnitt und das Gewicht der Leitung bestimmt. Wir können somit alle in Frage kommenden Grössen berechnen und angeben, wie viel die jährlichen Kosten einer gelieferten Pferdekraft betragen werden.

Führen wir diese Berechnung für verschiedene Werthe von E durch und beachten dabei, dass die Kosten der Maschinen und der Isolation der Leitung mit der Spannung steigen, so ergiebt sich, dass die Kosten der gelieferten Pferdekraft von der Spannung abhängig sind, und dass es in jedem Falle eine bestimmte günstigste Spannung giebt. Gestatten es die örtlichen Verhältnisse, so sollte diese Spannung gewählt werden. Es ist zu beachten, dass die Quadratwurzel in der obigen Gleichung für die Stromstärke nie grösser als 1 werden kann. Sie nähert sich diesem Werthe um so mehr, je niedriger die Spannung und je grösser die Entfernung ist. Soll die Anlage mit Vortheil arbeiten, so muss daher stets $i < 2\gamma$ sein; wäre $i = 2\gamma$, so würde die Hälfte der vom Generator abgegebenen Energie in der Leitung verloren gehen. Bei Wechselstromanlagen wird der Energieverlust in der Leitung, abgesehen von diesen wirthschaftlichen Gründen, noch dadurch beschränkt, dass der normale Betrag der zu übertragenden Energie gelegentlich stark überschritten wird, wie wir bereits im achten Kapitel zeigten.

Bei vorläufigen oder angenäherten Berechnungen des Kupfergewichtes, das für irgend eine Leitung erforderlich ist, benutzt man zweckmässig Tabellen oder Kurven, die ein für alle Mal angefertigt sind. Fig. 118a und b enthält eine Reihe solcher Kurven für Kraftübertragungen mittels Gleichstroms bei Spannungen von 1000, 2000, 5000 und 10000 V. Wenn man auch bei Gleichstrom selten Spannungen von 10000 V verwenden wird, so ist es doch zweckmässig, die Kraftübertragung mittels Gleichstroms den Berechnungen des

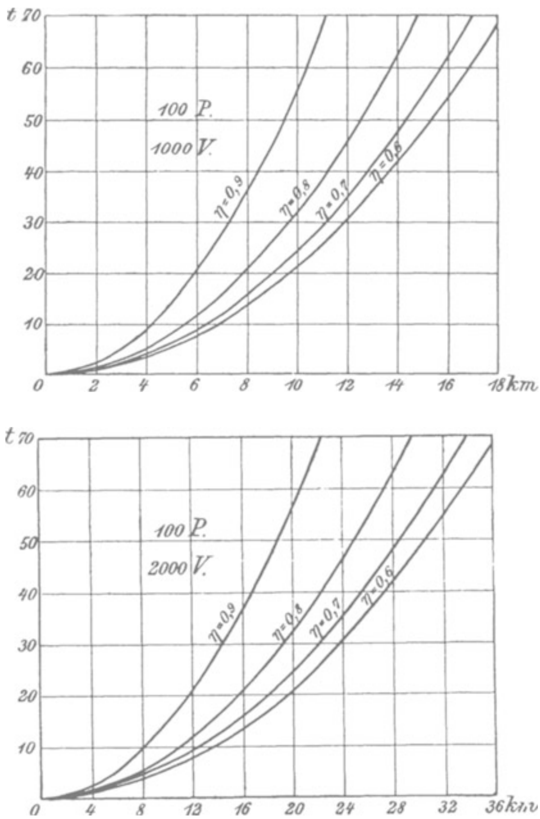


Fig. 118a.

Kupfergewichts zu Grunde zu legen und die andern Systeme darauf zu beziehen, wie es weiter unten geschehen wird. In den vier Diagrammen der Fig. 118 sind die Entfernungen, auf welche die Uebertragung stattfinden soll, als Abscissen und die Kupfergewichte als Ordinaten aufgetragen. Der Wirkungsgrad des Motors ist zu 91 % angenommen, und die Energie, die an seine Achse abgegeben wird, soll 100 P betragen. Für grössere oder geringere Energiebeträge ist das Kupfergewicht, das sich aus den Kurven ergiebt, entsprechend zu vermindern. Die eingetragenen Spannungen sind an den Klemmen des Generators gemessen und stellen also die höchsten Werthe zwischen den Leitungen dar. Wegen des Durch-

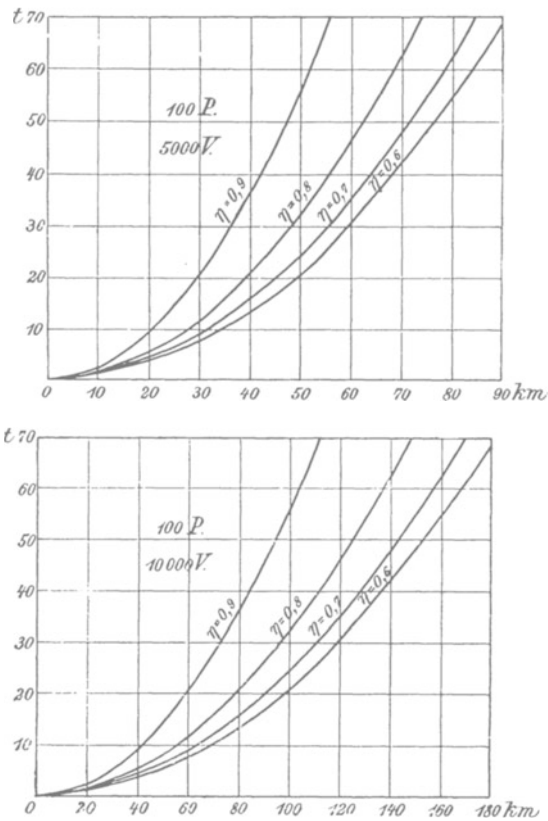


Fig. 118b.

hangs der Drähte ist bei der Bestimmung des Kupfergewichtes die betreffende Entfernung im Verhältnis von 1 : 1,025 vergrössert worden. Jede Zeichnung enthält vier Kurven, die sich auf verschiedene Werthe des Wirkungsgrades der Leitung allein beziehen; derselbe ist zu $\eta = 0{,}60$, 0,70, 0,80 und 0,90 angenommen. Die Anwendung dieser Kurven ist sehr einfach. Nehmen wir z. B. an, wir hätten eine bestimmte Energiemenge auf 30 km zu übertragen; die Klemmenspannung des Generators sei 5000 V und der Wirkungsgrad der Leitung 80 %. Aus Fig. 118 ergiebt sich sodann, dass wir für jede 100 P, die zu übertragen sind, etwa 12 t Kupfer aufzuwenden haben.

Fig. 119 a und b enthält ähnliche Kurven, die für vier verschiedene Werthe des Wirkungsgrades der Leitung abgeleitet sind. Die Spannungen sind als Abscissen und die Kupfergewichte als Ordinaten eingetragen; die einzelnen Kurven beziehen sich auf Entfernungen von 5, 10, 20 und 40 km. Die Kurven liefern daher das Kupfergewicht, wenn Spannung, Entfernung und Wirkungsgrad der Leitung gegeben sind.

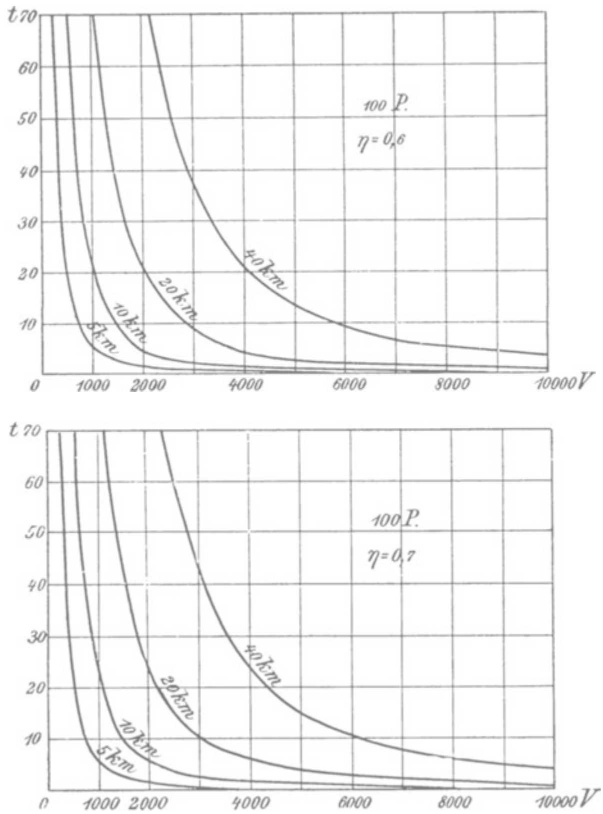


Fig. 119 a

Fig. 120 veranschaulicht die Beziehung zwischen Wirkungsgrad und Kupfergewicht der Leitung für verschiedene Entfernungen, aber bei der gleichen Spannung von 5000 V. Eine Leitung, deren Wirkungsgrad 90 % beträgt, erfordert z. B. bei einer Länge von 40 km für je 100 P ein Kupfergewicht von 36 t. Begnügt man sich

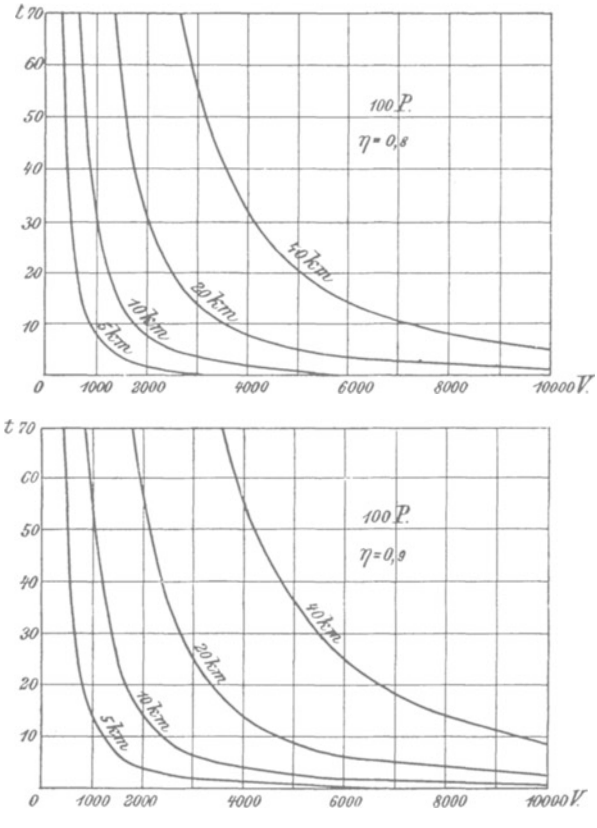


Fig. 119 b.

mit einem Wirkungsgrad von 80 %, so sind nur 20 t Kupfer erforderlich, bei 70 % nur 16 t u. s. w. bis 50 %. Für geringere Wirkungsgrade als 50 % nimmt das Kupfergewicht wieder zu, sodass es wegen der Anlagekosten unzweckmässig wäre, den Wirkungsgrad der Leitung geringer als 50 % zu wählen. Dies Ergebnis stimmt mit dem oben gefundenen überein; dort leiteten wir aus der Bedingung $i < 2\gamma$ ab, dass es unter keinen Umständen vortheilhaft sein würde, wenn mehr als die Hälfte der zu übertragenden Energie in der Leitung verloren ginge.

Wollen wir nun die verschiedenen Systeme der elektrischen Kraftübertragung in Bezug auf das Kupfergewicht vergleichen, so müssen wir uns zunächst über ein passendes Maass einigen, das der Vergleichung zu Grunde zu legen ist. Es ist selbstverständlich, dass die zu übertragende Energie, die Entfernung und der Wirkungsgrad übereinstimmen müssen. Hiervon abgesehen, ist das Kupfergewicht nur noch von der Spannung abhängig, die daher das Maass bei der Vergleichung zu bilden hat. Es fragt sich nur, was wir in diesem Zusammenhang unter Spannung zu verstehen haben. Bei Gleich-

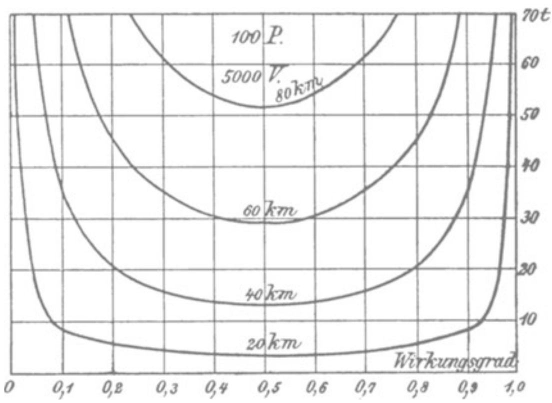


Fig. 120.

strom ist die Bedeutung völlig klar, beim Wechselstrom ist es jedoch zweifelhaft, ob wir die effektive oder die maximale Spannung einzuführen haben. Wenn es sich nur um die Auswahl von Maschinen handelte, wie sie von den verschiedenen Fabrikanten auf den Markt gebracht werden, so wäre die effektive Spannung maassgebend, da die Spannung, für die die Maschinen konstruirt und bestimmt sind, in effektiven Volt angegeben werden. In diesem Falle würde eine Kraftübertragungsanlage mittels Wechselstroms für 2000 V eine Leitung von gleichem Gewicht erfordern, wie eine solche mittels Gleichstroms für 2000 V, vorausgesetzt, dass bei ersterer die Stromstärke und Spannung keine Phasenverschiebung gegen einander aufweisen und sinusförmig verlaufen. Auf diese Weise dürfen wir jedoch die Frage nicht behandeln, denn bei der Wahl der höchsten zulässigen Spannung sind wir nicht durch die Schwierigkeit gebunden, eine Wicklung herzustellen, die hohe Spannung liefert, sondern vielmehr durch die Schwierigkeit, die Wicklung so zu isoliren, dass sie die Spannung auch wirklich aushält. Die Spannung, die man der Isolation zumuthen darf, und nicht die effektive Spannung ist daher für unsere Betrachtungen maassgebend und muss die Grundlage für die Vergleichung der verschiedenen Kraftübertragungssysteme bilden. So kann eine Wechselstrommaschine, welche eine effektive Spannung von 1000 V liefert und deren Spannungskurve sehr zackig verläuft, ihre Isolation ebenso sehr oder auch stärker beanspruchen als eine andere Wechselstrommaschine, die bei sinusförmigem Verlauf eine effektive Spannung von 2000 V liefert. Die Leitung müsste natürlich, wenn sie von der ersten Maschine gespeist würde, das vierfache Gewicht haben als bei Verwendung der zweiten Maschine. Man hat daher im Interesse der Sparsamkeit Maschinen zu benutzen, die eine Spannung von möglichst sinusförmigem Verlauf liefern.

Wir nehmen im Folgenden an, die ein- und mehrphasigen Wechselstrommaschinen seien so gebaut, dass ihre Spannung sinusförmig verläuft, und vergleichen die folgenden Systeme mit Gleichstrom: 1. Gewöhnlicher Wechselstrom, 2. Zweiphasiger Wechselstrom mit vier Leitungen, 3. Zweiphasiger Wechselstrom mit drei Leitungen, 4. Dreiphasiger Wechselstrom mit drei Leitungen. Der Einfachheit halber nehmen wir weiter an, dass bei allen Systemen Spannung und Stärke des zugeführten Stromes in gleicher Phase sind. In der Regel findet eine Phasenverschiebung statt, weshalb die Stromstärke und dem entsprechend auch das Kupfergewicht vergrössert werden muss. Bei Einphasenstromanlagen mit Synchronmotoren kann man die Phasenverschiebung vermeiden, wenn man den Motor in der S. 203 angegebenen Weise richtig erregt. Dies Mittel ist bei Kraftübertragungsanlagen mittels Mehrphasenströmen nicht anwendbar.

Man bedient sich hier zu diesem Zwecke einer Einrichtung, die von Dobrowolsky angegeben hat; sie besteht darin, dass in der Empfangsstation eine leerlaufende Wechselstrommaschine in die Leitung eingeschaltet wird. Eine solche Maschine wird mit Recht *Phasenregler* genannt; je nach der Anzahl der Ströme von verschiedener Phase, die der Generator erzeugt, wird ihr Anker mit zwei oder drei Stromkreisen versehen. Um ihre Wirkung zu erklären, gehen wir auf Fig. 121 zurück. OE bedeutet hier die zugeführte elektromotorische Kraft, bei der im Falle einer Kraftübertragung der Strom in den Motor eintritt, und OI die Stromstärke. Das Diagramm bezieht sich natürlich nur auf einen der Ströme. Man sieht, dass die Phasenverschiebung unter keinen Umständen Null werden kann, obgleich sie in Wirklichkeit gewöhnlich bedeutend kleiner ist, als wir sie im Diagramm der grössern Deutlichkeit halber dargestellt haben. Die Strecken OI und OE sind in Fig. 121 wiedergegeben. OI möge den Strom darstellen, der in der Leitung fliesst, und OI_1, die Projektion von OI auf OE, die Komponente, die Arbeit leistet. Es handelt sich nun darum, den Strom in der Leitung zu verringern, ohne die Arbeitsbedingungen des Motors zu ändern. Zu diesem Zweck schaltet von Dobrowolsky parallel zum Motor eine Wechsel-

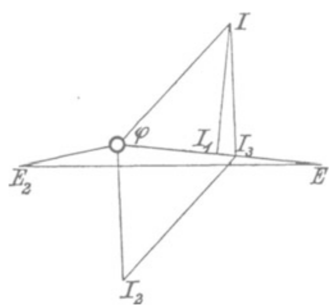


Fig. 121.

strommaschine, die so erregt wird, dass sie eine elektromotorische Kraft von höherm Betrage als die zugeführte liefert. Der Strom, den eine solche Maschine beim Leerlauf verbraucht, eilt der elektromotorischen Kraft voran und kann bei richtiger Wahl der Verhältnisse das Zurückbleiben des Motorstromes genau ausgleichen, sodass Stromstärke und Spannung in der Leitung in gleicher Phase sind. In dem Diagramm stellt EE_2 die elektromotorische Kraft des Phasenreglers dar, die im Verein mit der zugeführten elektromotorischen Kraft OE die resultirende OE_2 liefert. Der letztern entspricht die Stromstärke OI_2, die zum Betriebe des Phasenreglers erforderlich ist. Die Resultirende dieses Stromes und des Motorstromes OI wird durch die Strecke OI_3 dargestellt; es ist dies der Strom, der in Wirklichkeit in der Leitung fliesst. Der Strom des Phasenreglers ist sehr klein im Vergleich zum Motorstrom und beträgt nur 2 bis

3 % desselben; in der Zeichnung ist er der Deutlichkeit halber grösser gezeichnet. In der Praxis braucht man keine weitläufigen Rechnungen anzustellen, um die elektromotorische Kraft des Phasenreglers genau zu bestimmen. Wir haben nur einen Rheostaten vorzusehen, mit dem der Erregerstrom desselben verändert werden kann, und diesen so einzustellen, dass die Stärke des zugeführten Stromes ein Minimum wird. Eine Verstärkung oder Verringerung der Erregung wird eine Vergrösserung der Stromstärke zur Folge haben. Der Phasenregler kann durch eine kleine Dynamomaschine, die auf seiner Achse sitzt, erregt werden. Sein Antrieb erfolgt am besten vom Motor aus durch eine kleine Reibungskuppelung oder durch eine ähnliche Vorrichtung, die sich loslösen lässt, wenn der Synchronismus eingetreten ist.

Nachdem wir so von unserer eigentlichen Aufgabe abgeschweift sind, um zu zeigen, wie Leitungen mit Wechselstrom ohne Phasenverschiebung betrieben werden können, kehren wir wieder zu der Vergleichung der vier oben aufgezählten Systeme zurück. Die Grundlage bildet dabei die Uebertragung mittels Gleichstroms, und alle Systeme sollen bezüglich der Isolation der gleichen Anforderung gewachsen sein. Die Spannung zwischen zwei Leitern oder zwischen einem Leiter und Erde darf daher bei keinem System den für die Gleichstromanlage angenommenen Betrag überschreiten. Es wird die Kupfermenge bestimmt, die unter diesen Umständen für jedes System im Verhältnis zum Gleichstrom erforderlich ist.

Wir betrachten zunächst eine Uebertragung mittels Einphasenstroms. Die zu übertragende Energie ist der effektiven Spannung und die Beanspruchung der Isolation der maximalen Spannung proportional. Die effektive Spannung verhält sich daher zur Spannung des Gleichstroms wie $1 : \sqrt{2}$. Da sich die Kupfergewichte umgekehrt wie die Quadrate der Spannungen verhalten, so wird die Anlage beim Betriebe mit Einphasenstrom doppelt soviel Kupfer erfordern, wie beim Betriebe mittels Gleichstroms.

Die Uebertragung mittels Zweiphasenstroms in vier Leitungen kann als doppelte Uebertragung mittels Einphasenstroms aufgefasst werden und führt daher zu demselben Ergebnis.

Die Fortleitung von Zweiphasenstrom in drei Drähten scheint auf den ersten Blick eine Ersparnis an Kupfer zu bedeuten, da der gemeinsame Draht nur $\sqrt{2}$ mal soviel Strom fortzuleiten hat als jeder der beiden andern Drähte. Dies ist jedoch ein Trugschluss.

Denn durch Vereinigung der beiden Drähte haben wir die Potentialdifferenz zwischen den beiden andern auf den $\sqrt{2}$fachen Betrag des frühern Werthes gesteigert und, um der anfangs aufgestellten Bedingung zu genügen, müssen wir mit der Gesammtspannung heruntergehen. Hieraus ergiebt sich eine erhebliche Steigerung des Kupfergewichts der Leitung. Die Rechnung soll nicht in ihren Einzelheiten mitgetheilt werden; es möge das einfache Resultat genügen, dass bei diesem System 2,9 mal soviel Kupfer nöthig ist, wie bei Gleichstrom.

Bei Dreiphasenstrom in Sternschaltung ist die maximale Spannungsdifferenz zwischen zwei Drähten augenscheinlich

$$2\sqrt{E^2 - \frac{E^2}{4}} = E\sqrt{3},$$

wenn E die maximale Spannung eines der Ströme ist. Die entsprechende Uebertragung mittels Gleichstroms müsste daher mit der Spannung $E\sqrt{3}$ betrieben werden, und ist I die zugehörige Stromstärke, so wird die übertragene Energie $IE\sqrt{3}$. Bezeichnet man die Stromstärke in jeder Leitung des Dreiphasensystems mit i, so ist die übertragene Energie gleich $\frac{3}{\sqrt{2}} i E$. Es muss daher

$$i = I\sqrt{\frac{2}{3}}$$

sein. Ist W und w der Widerstand eines Leiters bei Gleichstrom und bei Dreiphasenstrom, so wird für gleichen Energieverlust in jeder Leitung

$$2\,W I^2 = 3\,w\,i^2.$$

Da nach der obigen Gleichung

$$3\,i^2 = 2\,I^2$$

ist, so muss auch $W = w$ sein. Für beide Systeme ist daher ein Draht vom gleichen Querschnitt zu benutzen. Da wir beim Dreiphasenstrom drei und beim Gleichstrom nur zwei Drähte nöthig haben, so verhalten sich die entsprechenden Kupfergewichte wie 3:2. Wenden wir die Dreiecksschaltung beim Dreiphasenstrom an, so führt eine ähnliche Untersuchung zu demselben Ergebnis.

Reicht man daher bei einer Kraftübertragung mittels Gleichstroms mit 10 t Kupfer aus, so sind bei gleicher Beanspruchung der Isolation erforderlich:

für Einphasenstrom	20 t
für Zweiphasenstrom mit 4 Leitungen	20 t
für Zweiphasenstrom mit 3 Leitungen	29 t
für Dreiphasenstrom mit 3 Leitungen	15 t.

Bei der Kraftübertragung mittels Dreiphasenstroms spart man daher gegenüber den übrigen Wechselstromsystemen erheblich an Kupfer für die Leitung. Es ist zu bedenken, dass wir die verschiedenen Wechselstromsysteme nur deshalb mit der Gleichstromübertragung verglichen haben, um einen gemeinschaftlichen Maassstab für die erstern zu gewinnen. Denn eine Gleichstromanlage lässt sich natürlich nicht mit so hoher Spannung betreiben, wie eine Wechselstromanlage, wie wir bereits in einem frühern Kapitel nachgewiesen haben. Handelt es sich daher um grosse Entfernungen, so ist eine Wechselstromanlage wegen des geringern Aufwands an Kupfer dem Gleichstrom stets vorzuziehen.

Ob die Leitung ober- oder unterirdisch geführt werden muss, hängt von einer Reihe örtlicher Bedingungen ab. Vielfach und besonders bei der Kraftvertheilung in dicht bevölkerten Bezirken ist nur eine Verlegung der Leitungen in die Erde zulässig. Auch in dem Falle, wo die Behörden nichts gegen Luftleitungen einzuwenden haben, können unterirdische Leitungen wegen klimatischer Einflüsse den Vorzug verdienen. Denn in Gegenden, wo die Winter sehr kalt sind oder die Sommer häufige und heftige Gewitter mit sich bringen, ist die Unterhaltung einer Luftleitung natürlich kostspielig. In solchen Fällen wendet man lieber ein System an, das seltener Störungen erfährt, wenn es auch anfangs theurer sein mag. Abgesehen von solchen besondern Verhältnissen werden jedoch blanke Luftleitungen, die mittels Isolatoren an Stangen geführt sind, häufig verwendet, besonders wenn es sich um grosse Entfernungen handelt.

Das Leitungsmaterial besteht meistens aus hart gezogenem Kupfer; es wird aber auch Silicium- und Phosphorbronze benutzt. Die Drähte müssen grosse Festigkeit und gute Leitungsfähigkeit besitzen, Eigenschaften, die sich zum gewissen Grade widersprechen. So besitzt reines weiches Kupfer die höchste Leitungsfähigkeit, hat jedoch nur eine Zugfestigkeit von 26 kg/qmm. Die Leitungsfähigkeit des hart gezogenen Kupfers ist um 3 % kleiner, seine Zugfestigkeit ist jedoch gleich 46 kg/qmm. Dagegen hat Phosphorbronze eine Zugfestigkeit von 71 kg/qmm, seine Leitungsfähigkeit beträgt aber nur ein Viertel von der des reinen weichen Kupfers. In der folgenden Tabelle sind die Konstanten der verschiedenen Materialien zusammengestellt.

Material	Zugfestigkeit in kg/qmm	Leitungs-fähigkeit
Reines weiches Kupfer	26	100
Hart gezogenes Kupfer	46	97
Siliciumbronze I	44	97
- II	56	80
- III	78	45
Phosphorbronze	71	26
Stahl	91	10

Der zwischen zwei Trägern ausgespannte Draht bildet eigentlich eine Kettenlinie; wir können uns diese Kurve aber durch eine Parabel ersetzt denken, da der Durchhang stets klein bleibt und da die Träger in gleicher Höhe angebracht sind. Unter diesen Umständen bestimmt der Quotient aus dem doppelten Durchhang durch die halbe Spannweite die Tangente des Winkels, den der Draht beim Verlassen eines Trägers mit der Horizontalen bildet, und somit auch das Verhältnis zwischen den vertikalen und horizontalen Kräften, die auf den Träger wirken. Die vertikale Kraft ist das Gewicht der halben Länge des ausgespannten Drahtes, und die horizontale Kraft, die wir annähernd gleich der Drahtspannung setzen können, wird daher

$$T = \frac{G\,S}{8f},$$

wo G das Gewicht des gespannten Drahtes, S die Spannweite und f den Durchhang bedeutet. Bezeichnet q den Drahtquerschnitt in Quadratmillimeter, so ist das Gewicht eines Drahtes von 1 m Länge ungefähr 0,008 q kg. Wir erhalten also für die auf den Draht wirkende Zugkraft

$$T = 0{,}001\, q \left(\frac{S}{f}\right) S$$

und für die auf jedes Quadratmillimeter wirkende Zugkraft

$$\tau = 0{,}001 \left(\frac{S}{f}\right) S.$$

So würde ein Draht, der bei einer Spannweite von 50 m einen Durchhang von 1 m besitzt, einer Zugkraft von 2,5 kg/qmm ausgesetzt sein. Wäre das Gewicht die einzige Kraft, die in Frage käme, so besässe ein solcher Draht aus hart gezogenem Kupfer die 18,4fache Sicherheit bezüglich des Durchreissens. Es wirken jedoch andre Kräfte mit, wie der Wind, die Belastung durch Schnee und Eis und die Temperaturänderungen. Wenn diesen bei der Errichtung der Leitung nicht genügend Rechnung getragen wird, so kann die berechnete Zugkraft erheblich zu klein ausfallen. Bei niedriger Temperatnr verkürzt sich der Draht, der Durchhang nimmt in Folge dessen ab und die Spannung τ zu. Bezeichnet L die Drahtlänge zwischen zwei Trägern, so ergiebt sich aus der Gleichung der Parabel

$$f = \sqrt{\frac{3}{8} S(L-S)},$$

folglich

$$\tau = \frac{0{,}00163\, S^{3/2}}{\sqrt{L-S}}.$$

Da der Ausdehnungskoefficient des Kupfers gleich 0,000017 angenommen werden kann, so erfährt ein Draht von der Länge L bei einer Temperaturänderung um t Grad eine Ausdehnung um $\varDelta L = 0{,}000017\, Lt$. Kennen wir die äusserste Sommer- und Wintertemperatur, so lassen sich die Grenzwerthe für die Drahtlänge L und für den Durchhang und die Spannung aus dem Zustande der Leitung bei ihrer Errichtung ableiten; wir können alsdann die Leitung so anlegen, dass der Sicherheitsfaktor bei der niedrigsten Wintertemperatur noch hinreichend gross bleibt.

Was die Stangen der Isolatoren, die Träger und die Blitzschutzvorrichtungen betrifft, so sind diese ähnlich wie in der Telegraphentechnik; nur pflegt die ganze Anlage stärker gehalten und besser isolirt zu sein. Vielfach werden Oelisolatoren von Johnson & Phillips benutzt, die eine Stromleitung längs der Oberfläche ausschliessen. Sie sind in verschiedener Form ausgebildet, ihren allgemeinen Charakter zeigt Fig. 122. Der Isolator hat eine äussere und eine innere Glocke; letztere taucht in einen ringförmigen Trog aus Porzellan, der am Stiel des Isolators verschoben werden kann und in seiner obern Lage durch den abgebildeten Stift gehalten wird.

Der Trog wird mit Oel gefüllt und verhindert somit jede Leitung längs der Oberfläche, die sonst stattfinden könnte. Bei der Reinigung und Neufüllung wird der Trog gesenkt.

Bevor die Isolatoren in Gebrauch genommen werden, sind sie alle daraufhin zu untersuchen, ob die Glasur unversehrt ist und ob das Porzellan keine Risse aufweist, die eine Leitung möglich machen könnten.

Um den Isolator elektrisch zu prüfen, wird er auf den Kopf gestellt; der innere Raum wird mit angesäuertem Wasser gefüllt und dann die ganze Glocke bis nahe an den Rand in angesäuertes Wasser getaucht. Ist die Isolation vollkommen, so darf von der

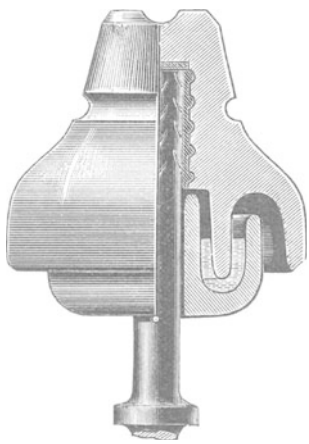


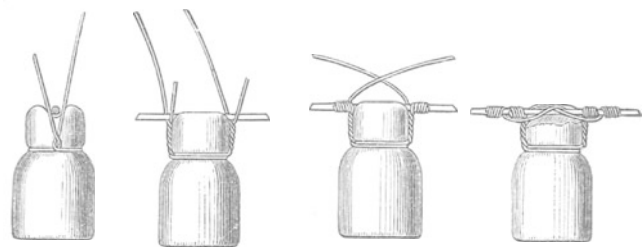
Fig. 122.

Flüssigkeit im Innern des Isolators kein Strom nach der ihn umgebenden übertreten.

Der Draht soll entweder in der oben oder in der an der Seite befindlichen Rinne befestigt werden; die letztere Befestigungsweise ist besonders dann anzuwenden, wenn der Draht beträchtlichem seitlichen Zuge ausgesetzt ist. Beide Methoden sind aus Fig. 123 und 124 ersichtlich, wo die Ansichten *abcd* und *abc* verschiedene Stadien der Befestigung darstellen.

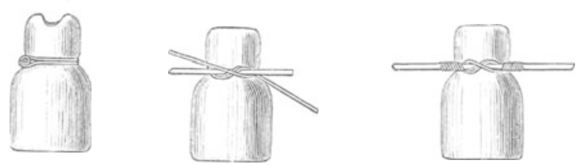
Da Drähte und Kabel nur in begrenzter Länge zu erhalten sind und nur so nach dem Orte ihrer Verwendung geschafft werden können, so wird man häufiger Verbindungen machen müssen. Eine Verbindungsstelle soll nicht nur ebenso fest wie der Draht oder das

Kabel selbst sein, sondern sie muss auch vollkommenen Kontakt haben, da andernfalls der durchfliessende Strom dieselbe erhitzen und schliesslich zerstören würde. Es ist auch wünschenswerth, keine andern Metalle als Leitermetall zu verwenden, um elektrolytische Vorgänge zu vermeiden. Die Verwendung von Loth ist



a b Fig. 123. c d

natürlich unumgänglich nothwendig und muss eine Ausnahme von dieser Regel machen; aber es ist nicht rathsam, Eisenverbindungen für Kupferleitungen zu nehmen, oder irgend eine Kombination ver-



a b c

Fig. 124.

schiedener Metalle. Zwischen dünnen Drähten kann man eine feste Verbindung in der Weise, wie es Fig. 125 zeigt, herstellen. Um den Kontakt zu verbessern, wird der mittlere Theil verlöthet. Fig. 126

Fig. 125.

zeigt eine andere Art der Verbindung, die auch für dünne Drähte anwendbar ist und leicht hergestellt werden kann. AA_1 ist der eine Draht, BB_1 der andere; die Enden A und B_1 werden lang genug gelassen, sodass sie um den mittlern Theil bis zu ihrer Berührung herumgewickelt werden können; dann werden sie miteinander verflochten, wie es Fig. 127 zeigt.

Wenn die Drähte so dick sind, dass sie nicht mehr um einander gewickelt werden können, so wird zuweilen die in Fig. 128 dargestellte Verbindungsweise angewandt. Die beiden Drahtenden werden kurz rechtwinklig umgebogen und dann so neben einander gelegt,

B Fig. 126. A_1

dass die Endpunkte nach aussen zu liegen kommen. In dieser Lage werden sie durch eine Klammer zusammengehalten, während sie mit einer Lage von Bindedraht aus demselben Material wie der Leiter

Fig. 127.

umwickelt werden. Wenn der Raum zwischen den beiden Enden vollkommen mit Bindedraht ausgefüllt ist, wird die ganze Stelle verlöthet.

Fig. 128.

Kabel werden mit einander verbunden, indem man entweder die einzelnen Adern verbindet oder besondere Verbindungsstücke anwendet. Ein solches ist von Lazare Weiller in sehr zweck-

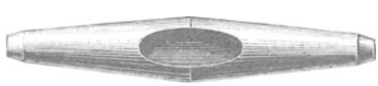


Fig. 129.

mässiger Form eingeführt; es besteht aus einem hohlen Doppelkegel mit einer Oeffnung in der Mitte (Fig. 129). Das Kabelende wird an dem einen Ende des Rohres eingeführt und aus der mittleren Oeffnung wieder herausgeführt; dann wird das Ende umgelegt und wieder durch die Oeffnung hineingedrückt. Durch Ziehen an den freien

Enden des Kabels wird das andere fest in den Konus hineingezwängt. Das Ende des zweiten Kabels wird in derselben Weise behandelt, und sodann, um den Kontakt zu sichern und um jedes Zurückgleiten zu verhindern, flüssiges Loth in die mittlere Oeffnung gegossen.

Fig. 130.

Fig. 130 giebt einen Querschnitt der Verbindungsstelle; die Kabel befinden sich in ihrer endgültigen Lage. Als eine zweckmässige Zusammensetzung für das Loth empfiehlt Lazare Weiller zwei

Fig. 131.

Theile Zinn und ein Theil Blei. Die Kabeldrähte und Verbindungsstücke sind beide aus Silicium-Bronze hergestellt, wodurch eine elektrolytische Wirkung ausgeschlossen ist.

Fig. 132.

Eine vorzügliche Verbindung, die kein Loth erfordert, ist von Schmidmer & Co. in Nürnberg eingeführt worden. Dieselbe wird aus einer sehr weichen Kupferhülse gebildet, die über die zu ver-

Fig. 133.

bindenden Drähte gezogen ist, und dann mit besonderen Zangen verdreht wird. Fig. 131 zeigt die Hülse und die Drahtenden vor dem Verdrehen und Fig. 132 nach dem Verdrehen. Auch ziemlich starke Kabel und solche von ungleichem Querschnitt können auf diese Weise verbunden werden, wie Fig. 133 zeigt. Die Festigkeit der Verbindungsstelle ist der des Leiters selbst nahezu gleich.

Ein sehr wichtiger Gegenstand bei oberirdischen Leitungen ist der Blitzschutz[1]). Die Schwierigkeit liegt nicht darin, Apparate zu konstruiren, die den Blitz zur Erde ableiten, sondern vielmehr darin, zu verhindern, dass der meistens hochgespannte Leitungsstrom dem durch den Blitzstrahl gebildeten Lichtbogen folgt. Die gewöhnlichen Telegraphenblitzableiter sind daher für Kraftübertragungen meist unbrauchbar, und man hat für diesen Zweck eine grosse Zahl besonderer Apparate konstruirt.

Einer der einfachsten und zuverlässigsten, der allerdings nur in Wechselstromanlagen zu verwenden ist, stammt von Wurts und

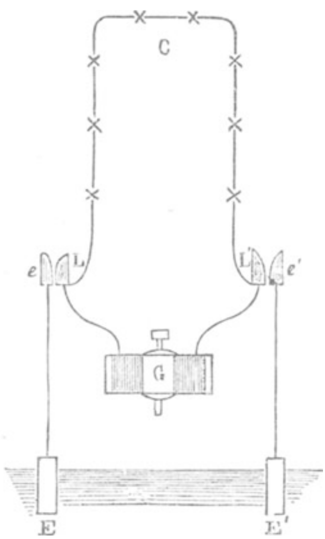


Fig. 134.

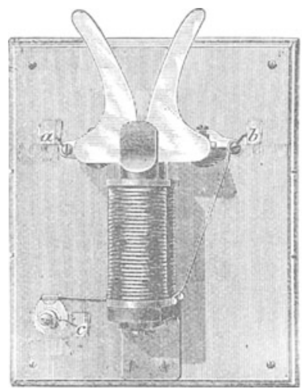


Fig. 135.

besteht aus einer Reihe gezähnter Metallcylinder, die von einander isolirt sind und in einer Reihe, einer coaxial dem andern, eng auf einander folgen. Im Allgemeinen sind sieben solcher Cylinder vorgesehen, von denen der mittlere an Erde liegt, während die beiden äussern mit den beiden Leitungsdrähten verbunden sind. Ein solcher

[1]) Mit der Frage der Blitzableiter für Starkstromanlagen hat sich neuerdings auch der Verband Deutscher Elektrotechniker beschäftigt und dadurch einen in der El. Zschr. 1896, S. 511 abgedruckten Vortrag von Görges veranlasst, der einen guten Ueberblick über die jetzt gebräuchlichen Blitzschutzvorrichtungen gewährt.

Satz wird für Wechselströme bis zu 1000 V Spannung benutzt; bei höhern Spannungen schaltet man mehrere solcher Gruppen hintereinander und ändert die Verbindungen entsprechend. Dem Apparat liegt der Gedanke zu Grunde, dass der Leitungsstrom nicht die nöthige Spannung besitzt, um von einem Cylinder zum folgenden überzuspringen, während dies ein Blitzschlag ohne Weiteres thut. Die Cylinder sind aus einer Zink-Antimon-Legirung hergestellt, zwischen der sich der Wechselstrom-Lichtbogen nicht hält. Bei Verwendung von Gleichstrom gewährt der Wurts'sche Apparat nicht

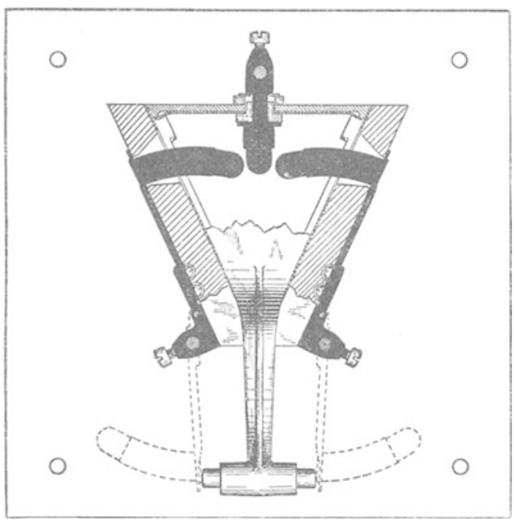


Fig. 136.

genügenden Schutz, da der Lichtbogen zwischen der Legirung nur dann erlischt, wenn der Strom durch Null gegangen ist.

Für Gleichstromleitungen hat Elihu Thomson eine Blitzschutzvorrichtung ersonnen, die in Fig. 134 und 135 abgebildet ist. G ist der Generator und C die Leituug (für Bogenlampen), von der jedes Ende geschützt ist. Der Blitzschlag geht von L nach E und dann zur Erde. Folgt der Leitungsstrom, so wird der Lichtbogen durch den Elektromagnet M nach oben geblasen. Da hier die Elektroden weiter von einander entfernt und nicht erwärmt sind, so wird der Lichtbogen sofort unterbrochen.

Eine sehr geistvolle Blitzschutzvorrichtung (Fig. 136) wurde durch die Westinghouse Co. eingeführt. Sie ist für Gleich- und Wechselstrom verwendbar und besteht aus einer verschlossenen Büchse mit einer festen Kohlenelektrode, welche durch den Boden ragt, und mit zwei beweglichen Elektroden, die durch Bohrungen in den Seitenwänden führen. Die beweglichen Elektroden sind an drehbaren Armen befestigt und mit den Leitungen verbunden; die feste Elektrode liegt an Erde. Springt ein Blitzschlag von der einen Kohle zur andern über und versucht der Leitungsstrom zu folgen, so dehnt die plötzlich erzeugte Wärme die Luft im Innern der Büchse mit explosiver Kraft aus und schleudert die beweglichen Elektroden nach auswärts, sodass der Lichtbogen unterbrochen wird. Die Bewegung wird durch Gummipolster gehemmt, die sich oben am Apparat befinden; die Arme fallen daher in ihre alte Lage zurück und sind damit wieder für den nächsten Blitzschlag in Bereitschaft.

Zwölftes Kapitel.

Beispiele von Uebertragungen und Vertheilungen elektrischer Energie. — Das Elektricitätswerk der Dresdener Bahnhöfe. — Die Kraftübertragung Eichdorf-Grünberg. — Das Elektricitätswerk in Wynau. — Die Kraftübertragungsanlagen in La Goule. — Das Elektricitätswerk der Budapester Allgemeinen Elektricitäts-Aktiengesellschaft. — Die Kraftübertragung Laucherthal-Sigmaringen. — Die Hochspannungsanlage in Locle-Chaux de Fonds. — Die Drehstromanlage in Bellegarde. — Die Drehstromanlage in Rheinfelden.

In den vorhergehenden Kapiteln haben wir die allgemeinen Principien der elektrischen Kraftübertragung behandelt, die für alle Anlagen Geltung besitzen. Was die Einzelheiten der Ausführung und die speciellen Systeme der verschiedenen Techniker anbetrifft, so hat die Erfahrung gezeigt, dass ebenso wie bei Beleuchtungsanlagen auch bei der Kraftübertragung kein einziges System allgemein verwendbar ist, sondern dass die Anlage in jedem einzelnen Falle den besondern Verhältnissen anzupassen ist.

Eine elektrische Kraftübertragung stellt mancherlei Ansprüche an die Technik. Zuerst handelt es sich um die Maschinen, die die Energie an der primären Station in elektrischen Strom verwandeln; also in dem Falle, wo die Energie von einer Wasserkraft herrührt, müssen Sammelbecken, Dämme, Schleusen, Turbinen oder Wasserräder, Regulirvorrichtungen u. s. w. gebaut werden. Hierzu kommen die Generatoren selbst mit den nothwendigen Regulirapparaten, die Leitung, sowie die Motoren mit Zubehör an der Empfangsstation. Was die elektrische Seite solcher Anlage betrifft, so ist diese in den vorhergehenden Kapiteln behandelt. Wir sind dabei aber nicht auf die genauern Einzelheiten der Maschinen und sonstigen Apparate eingegangen. Es würde dies den Rahmen des vorliegenden Buches weit überschreiten, da wir alsdann die Konstruktion und die Herstellung von Dynamomaschinen, Transformatoren, Schaltbrettern

u. s. w. eingehend beschreiben müssten. Wir verweisen deshalb in dieser Beziehung auf die ausführlichern Werke und begnügen uns damit, dem Leser nur eine Anzahl von Beispielen für die Uebertragung und Vertheilung elektrischer Energie vorzuführen.

Das Elektricitätswerk der Dresdener Bahnhöfe. — Ein Beispiel für Vertheilung, weniger für Uebertragung elektrischer Energie bildet das Elektricitätswerk der Dresdener Bahnhöfe[1]), das die Werkstätten und Gleisanlagen von fünf mehr oder weniger getrennten Bahnhofs- und Hafengebieten mit Kraft und Licht versorgt. Das gesammte zu speisende Areal beträgt 1,4 qkm und die grösste Entfernung zwischen Centrale und Verbrauchsstelle 6 km.

Die Maschinenanlage, die von Siemens & Halske gebaut worden ist, umfasst vier Dampfdynamomaschinen zu je 300 P und eine zu 600 P, die Drehstrom von 150 V erzeugen. Die Dampfmaschinen sind nach dem liegenden Tandem-Compoundsystem konstruirt und tragen auf ihrer Kurbelwelle ausser einem Schwungrad die Anker der Drehstrom- und Erregermaschine. Diese ist nach dem Innenpoltypus ohne besondern Kommutator gebaut und leistet 182 A bei 110 V. Eine Erregermaschine genügt für mehrere Drehstrommaschinen, von denen die zu 300 P nur einen Erregerstrom von 50 A gebrauchen. Die Drehstrommaschinen (Type *R*) bestehen aus einem äussern feststehenden, kranzförmigen Anker und einem innern rotirenden, sternförmigen Magnetgestell. Die Erregerspulen auf den Polfortsätzen erhalten ihren Strom durch zwei Schleifringe. Der Ankerring, der ebenso wie die Polansätze aus Eisenblechen zusammengesetzt ist, besitzt an seinem innern Umfang Nuthen zur Aufnahme der Kupferstäbe, die in Sternschaltung verbunden sind. Der Umdrehungszahl 100 in der Minute und der Polzahl 60 entspricht die Periodenzahl 50 der Maschine, von deren Bauart Fig. 137 und 138 ein anschauliches Bild geben.

Um bei einem Satz parallel geschalteter Drehstrommaschinen die Belastung jeder einzelnen Maschine ohne Gefährdung des Synchronismus in weiten Grenzen ändern zu können, wie es z. B. bei Einschalten einer Zusatzmaschine vorkommt, lässt sich vom Schaltbrett aus der Centrifugalregulator der Dampfmaschinen verstellen und dadurch die Dampfzufuhr verändern. Diese Einrichtung ist deshalb

---

[1]) R. Ulbricht, Das Elektricitätswerk der Dresdener Bahnhöfe. El. Zschr. 1895, S. 401.

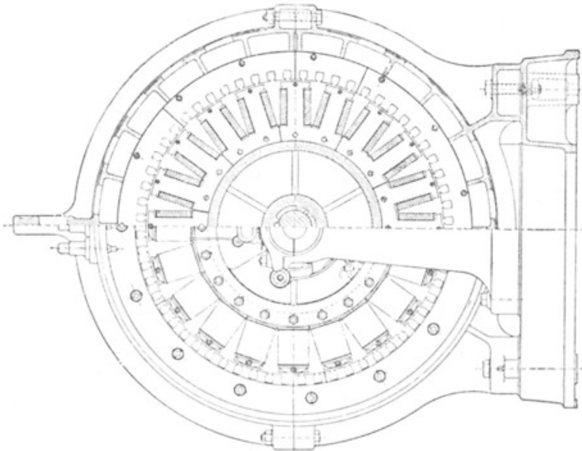


Fig. 138.

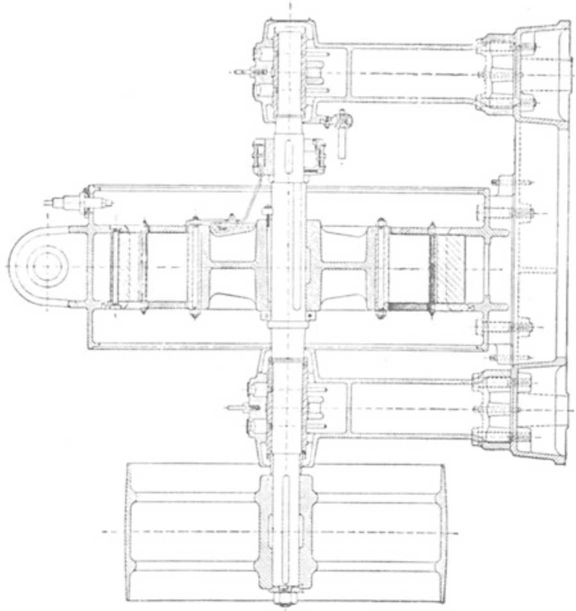


Fig. 137.

nöthig, weil die Wirkung des Centrifugalregulators von der Belastung der Dampfmaschine abhängt und nur bei bestimmter Belastung auf bestimmte Umdrehungszahl einstellt. Wenn also auch eine neu einzuschaltende Maschine schon auf synchronen Gang gebracht ist, so hat sie doch noch keine Belastung wie die eingeschalteten, und deshalb tritt nach dem Einschalten kein Synchronismus ein. Es wird nun vom Schaltbrett mittels eines kleinen Elektromotors ein Laufgewicht am Regulator verschoben und dadurch bei derselben Geschwindigkeit eine verschiedene Dampfzufuhr möglich gemacht.

Der Strom wird von den Maschinen nach drei Sammelschienen des Schaltbretts geleitet und verzweigt sich von da nach Transformatoren von je 100 Kilowatt Leistung, deren Zahl nach Fertigstellung der Anlage 15 betragen soll. Hier wird die Maschinenspannung von 115 V auf 3118 V gebracht. Die Hochspannungsleitungen gehen dann zunächst wieder zu Sammelschienen am Schaltbrett, um sich ferner in drei Netze zu theilen, von denen das erste die Werkstätten, das zweite den Hafen und das dritte den Friedrichstädter, den Altstädter und den Neustädter Bahnhof mit Strom speist. Anfangs bestehen die Leitungen aus dreiadrigen, verseilten Kabeln, die sich sodann in oberirdisch geführten blanken Kupferdrähten fortsetzen.

Damit das Einrücken voll belasteter Motoren die Beleuchtung möglichst wenig beeinflusst, ist das Licht in eine Phase verlegt und die Maschinenschaltung so getroffen, dass z. B. von drei parallel geschalteten Maschinen nur eine als Drehstrommaschine arbeitet, die beiden andern aber nur als gewöhnliche Wechselstrommaschinen an die Phase angeschlossen sind, welche die Beleuchtung versorgt. Gleichzeitig ist die Dampfzufuhr der ersten Maschine so bemessen, dass sie allein die Leistung der Motoren bestreitet. Man erkennt dies daran, dass in allen drei Phasen dieselbe Spannung herrscht, wie gross auch der Energieverbrauch in der Beleuchtungsphase ist.

Die benutzten Drehstrommotoren nebst Transformatoren stammen gleichfalls von Siemens & Halske. Sie treiben theils die Werkzeugmaschinen, theils Aufzüge und Krähne an und haben eine Spannung von 120 V und Dreieckschaltung. Beim Anlassen sind Widerstände in den Ankerkreis geschaltet, die allmählich kurz geschlossen werden.

Das Beleuchtungsnetz mit den zugehörigen Transformatoren, die nur für gewöhnlichen Wechselstrom eingerichtet sind, wurde von der Firma Helios eingerichtet. Die Niederspannung beträgt hier $2 \times 37{,}5$ V, die direkt für die Glühlampen von 6,5 bis 25 A verwendet wird, während die Bogenlampen in Einzelschaltung nur an der halben Spannung liegen. Die Transformatoren stehen in unmittelbarer Nähe der Hochspannungsmasten in eisernen Säulen und leisten jeder 10 Kilowatt.

Die Kraftübertragung in Eichdorf-Grünberg. — Als Beispiel einer Uebertragung elektrischer Energie auf grössere Entfernung mittels Drehstroms von hoher Spannung sei die Anlage in Eichdorf (Schlesien)[1]) angeführt, die ebenfalls von Siemens & Halske gebaut wurde. Es wird von diesem Orte nach dem 25 km weit entfernten Grünberg die Energie geleitet, die man aus den Wasserkräften des Bober gewinnt. Auf der primären Station treiben ein unterschlächtiges Wasserrad von 90 P und zwei Turbinen von zusammen 250 P zwei Drehstromgeneratoren von 80 P und 220 P an, von denen jeder mit einer direkt gekuppelten Erregermaschine (110 V) versehen ist. Ausserdem ist eine 300pferdige Dampfmaschine aufgestellt, die mit einer Drehstrommaschine direkt gekuppelt ist. Sie dient vorläufig als Reserve und soll besonders bei Eisgang des Bober in Thätigkeit treten. Die Spannung des primären Kreises beträgt 225 V in jeder Phase, die mittels dreier Transformatoren auf 10000 V umgeformt wird.

Die Fernleitung besteht aus drei blanken Kupferdrähten von je 35 qmm Querschnitt und ist oberirdisch in einer Höhe von etwa 10 m an Holzmasten befestigt, die an einer Seite der Chaussee in Entfernungen von je 40 m eingegraben sind. Zur Isolirung dienen Porzellanisolatoren mit dreifachem Mantel, von denen je zwei an der einen und je einer an der andern Seite des Mastes eingeschraubt sind, so dass die drei Leitungen in den Ecken eines gleichseitigen Dreiecks von 60 cm Seitenlänge angeordnet sind. Als Blitzschutz dient ein Stacheldraht, der längs der ganzen Strecke über den Leitungsdrähten verläuft und vielfach zur Erde abgeleitet ist. An Wegübergängen ist die Leitung noch von besondern Drahtnetzen umgeben, damit das Ende eines durchgerissenen Hochspannungsdrahtes nicht zur Erde fallen kann.

Beim Eintritt in die Stadt Grünberg verzweigt sich die Fern-

---

[1]) W. Klug, Die elektrische Kraftübertragungsanlage Eichdorf-Grünberg i. Schl. El. Zschr. 1896, S. 688.

leitung in mehrere mit Gummi isolirte Linien, die zu den sekundären Transformatoren führen. Als Stützen sind auch in der Stadt Holzmasten beibehalten. Die Schutznetze sind aber hier durchweg angebracht und noch besonders verstärkt, wo Telephonleitungen die Hochspannungsleitung kreuzen.

Die sekundären Transformatoren, von denen vorläufig sieben von 30 bis 50 Kilowatt zur Anwendung kommen, befinden sich in besondern Blechsäulen hoch über dem Erdboden und erniedrigen die Spannung auf 120 V. Von hier aus verzweigt sich dann das Niederspannungsnetz, das im Innern der Stadt aus dreifach koncentrischen Bleikabeln besteht, während für die Stadtperipherie oberirdisch geführte Leitungen verwendet werden.

Das Elektricitätswerk in Wynau (Schweiz) möge auch noch in diesem Zusammenhange erwähnt werden. Wir brauchen es nicht mehr näher zu beschreiben, da es in ähnlicher Weise von derselben Firma wie das vorhergehende erbaut ist. Die Anlage, welche die Wasserkraft der Aare ausnutzt, umfasst fünf Drehstrommaschinen von je 750 P, von denen jede mittels einer konischen Uebersetzung von der Welle einer Turbine angetrieben wird. Ausserdem sind noch zwei kleinere Turbinen zum Betrieb der Erregermaschine vorhanden. Der Strom der Generatoren wird durch Transformatoren von 450 auf 8000 V umgeformt und fliesst in oberirdisch verlegten Leitungen zu den Verbrauchsstellen, wo er wieder auf 120 V transformirt wird. Die Entfernungen zwischen Centrale und Konsumenten schwanken zwischen 2,5 und 12 km. Licht und Kraft werden von derselben Leitung aus gespeist.

Die Kraftübertragungsanlage in La Goule[1]), einem Orte, der im Schweizer Jura unmittelbar an der französischen Grenze liegt, versorgt ebenfalls eine grössere Anzahl von benachbarten Ortschaften in einem Kreise von 25 km Durchmesser mit Licht und Kraft. Im Ganzen waren im ersten Betriebsjahre schon 17 Gemeinden, von denen sechs auf französischem Gebiet liegen, an das Leitungsnetz angeschlossen, das durchweg doppelt ausgebildet ist, indem die Leitungen für Kraft und Licht vollständig von einander getrennt sind. Die Anlage ist von den Oerlikoner Werken errichtet und benutzt einphasigen Wechselstrom.

---

[1]) E. Blattner, Das Elektricitätswerk „La Goule". El. Zschr. 1895, S. 473. Vgl. auch 1896, S. 582.

Die Betriebskraft wird dem Flusse Doubs entnommen, der an der Centrale von La Goule ein nutzbares Gefälle von 26 m aufweist. Die Wassermenge ist auch bei niedrigstem Stande noch so gross, dass 4000 P gewonnen werden können; für den Anfang ist jedoch der elektrische Theil der Anlage nur für 1500 P berechnet, die von drei Turbinen geliefert werden. Die Wechselstromgeneratoren besitzen einen rotirenden Feldmagnet, der direkt auf der senkrechten Turbinenachse aufsitzt und durch zwei Schleifringe den Erregungsstrom zugeführt erhält, für dessen Erzeugung besondere zweipolige Gleichstrommaschinen (von je 30 A bei 80 V) dienen, die mittels Riemen von den Turbinen angetrieben werden. Die Wechselstromgeneratoren absorbiren je 500 P und erzeugen 63 A und 5500 V bei 200 Umdrehungen in der Minute. Die Periodenzahl beträgt 50, die Zahl der Ankerspulen 30. Die Erregung verzehrt 2400 Watt, also $^3/_4\,\%$ der verfügbaren Leistung.

Die Hochspannungsleitungen führen unterirdisch zum Schaltbrett und von da nach aussen, wo sie an Holzgestängen weitergeführt werden. Zur Isolation dienen gewöhnliche Porzellanisolatoren. Die Leitung hat im Ganzen eine Länge von 36 km und zerfällt in sechs Stromkreise, die nur Anfangs an denselben Stangen befestigt sind und sich später nach verschiedenen Richtungen trennen, so zwar, dass noch immer zwei Stromkreise, der eine für Licht und der andere für Kraft, nebeneinander verlaufen. An den Verbrauchsstellen befinden sich in besondern gemauerten Häuschen die Transformatoren, wiederum für Licht und Kraft getrennt, sodass von jeder Station zwei getrennte Niederspannungsleitungsnetze ausgehen, die nach dem Dreileitersystem angeordnet sind und ebenfalls oberirdisch verlaufen.

Das Elektricitätswerk der Budapester Allgemeinen Elektricitäts-Aktiengesellschaft. — Die Stadt Budapest wird von zwei Centralen aus mit elektrischer Energie versorgt, von denen die eine das reine Wechselstromsystem, die andere ein gemischtes System mit Wechselstromerzeugung und Gleichstromvertheilung befolgt. Die letztere[1]), welche der Budapester Allgemeinen Elektricitäts-Aktiengesellschaft gehört und von der Elek-

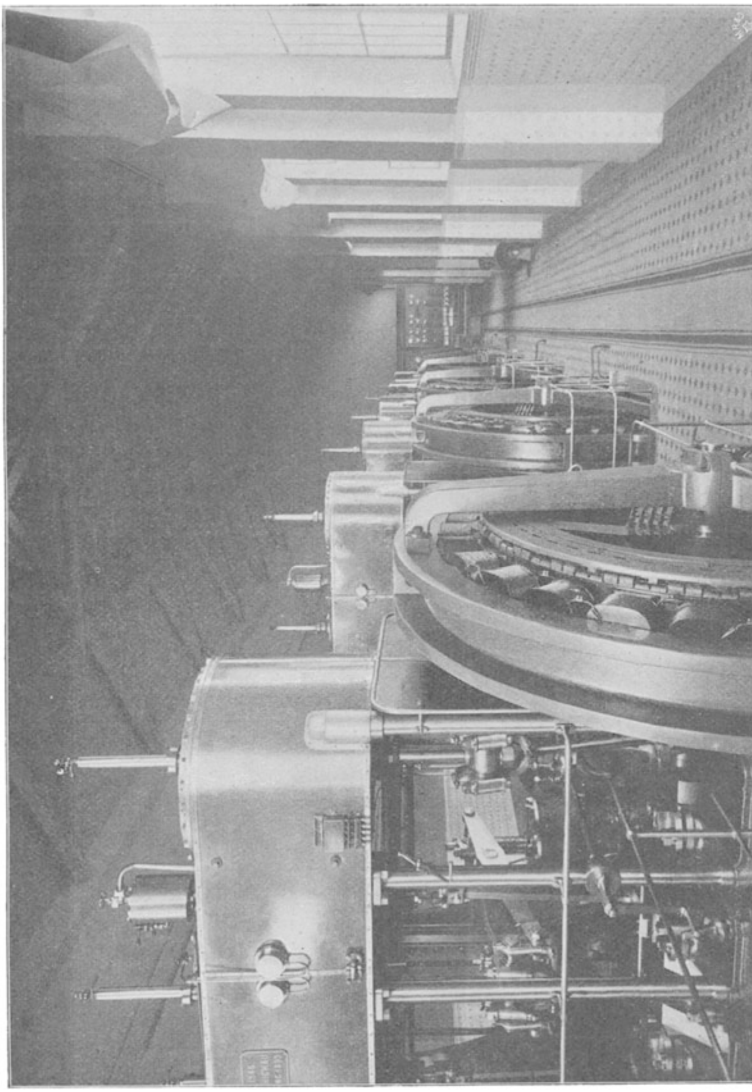
[1]) Kittler, Das Elektricitätswerk der Budapester Allgemeinen Elektricitäts-Aktiengesellschaft in Budapest. El. Zschr. 1895, S. 264.

tricitäts-Aktiengesellschaft, vormals Schuckert & Co., Nürnberg, erbaut ist, soll uns im Folgenden beschäftigen.

Die primäre Station, wo der zweiphasige Wechselstrom von etwa 1800 V Spannung erzeugt wird, liegt ausserhalb der Stadt. Von hier führen koncentrische Kabel nach der 3,5 km entfernten Umformerstation, wo der Wechselstrom mittels rotirender Transformatoren in Gleichstrom von 230 bis 360 V Spannung umgesetzt wird. Diese Umformer bestehen aus einem Wechselstrommotor und einem Gleichstromgenerator mit gemeinschaftlicher Achse. Zum Ausgleich bei stark veränderlicher Belastung dienen vier Akkumulatorenbatterien von je 148 Zellen, die zu den Gleichstromgeneratoren parallel geschaltet werden.

Da es bei dem Bau der Anlage darauf ankam, möglichst schnell Strom liefern zu können, so stellte man zuerst einen kleinen Maschinensatz auf, der von Lokomobilen angetrieben wird. Er ist in elektrischer Beziehung nicht verschieden von dem später errichteten Hauptheil der Anlage, auf den wir uns hier beschränken wollen. Er umfasst in erster Linie drei grosse Dampfdynamomaschinen von zusammen 1500 P, die von 5 Kesseln gespeist werden. Die Dampfmaschinen stammen von F. Schichau (Elbing) und sind Dreifach-Expansionsmaschinen mit Einspritzkondensation, deren Schwungrad gleichsam von dem Anker der Aussenpolmaschinen gebildet wird (Fig. 139). Das feststehende Magnetgestell aus Flusseisen ist zweitheilig und besitzt 28 Pole. Da die Umdrehungszahl 112 in der Minute beträgt, so ist die Periodenzahl ungefähr gleich 26. Die Leistung jeder Maschine beläuft sich auf 335 Kilowatt bei einer Spannung von 1800 bis 1900 V in jeder Phase. Die Ströme, die um 90⁰ in der Phase gegen einander verschoben sind, werden von Schleifringen abgenommen, die mit Abzweigungen der geschlossenen Ankerwicklung in Verbindung stehen. Die Erregung geschieht durch Nebenschlussmaschinen, die bei 200 V Spannung und 450 Umdrehungen in der Minute 10 Kilowatt leisten. Sie werden mittels Stirnrädern von der Kurbelwelle der Dampfmaschine angetrieben.

Von der primären Station führen drei koncentrische Kabel von je 2×120 qmm nach der Unterstation in der Stadt, wo zwei Umformer von je 120 Kilowatt und zwei von je 240 Kilowatt aufgestellt sind. Die ersten haben 8 Pole und 400 Umdrehungen in der Minute, die andern 14 Pole und 225 Umdrehungen. Die Wechselstrommotoren, die durch Akkumulatoren erregt werden, müssen erst



mit Hülfe der Gleichstrommaschinen auf synchronen Gang gebracht werden, bevor man sie mit dem primären Stromerzeuger verbindet. Das sekundäre Leitungsnetz ist nach dem Dreileitersystem ausgebildet.

Die fertige Anlage wurde in allen ihren Theilen von einer Kommission unter Leitung von Prof. Kittler einer eingehenden Untersuchung (l. c. S. 314) unterworfen, von deren Resultaten hier einige folgen, die sich auf die elektrischen Maschinen beziehen:

Primäre Wechselstrommaschine.

Nutzspannung	1785 V
Stromstärke in Phase I	85,7 A
Stromstärke in Phase II	90,2 A
Erregerspannung	206,5 V
Erregerstromstärke	36,2 A
Leistung im Erregerkreise	7500 Watt

Gesammter in den Umformer eingeleiteter Effekt	284 000 Watt
Effektverlust in der Fernleitung	15 600
Nutzleistung der primären Maschine	299 600
Verlust im Anker	8 550
Erregereffekt	7 450
Leerlauf	17 000
Gesammtleistung	332 600 Watt
Wirkungsgrad	90 %

Wechselstrom-Gleichstrom-Umformer.

Zahl der Umdrehungen in der Minute . . 224

a) Wechselstrommotor.

Spannung	1695 V
In den Umformer eingeleiteter Effekt:	
Phase I	136 240 Watt
Phase II	147 760
Summa	284 000

Scheinbar eingeleiteter Effekt:
(Strom mal Spannung)

Phase I 85,7 × 1695	145200 Watt
Phase II 90,2 × 1695	152800
Summa	298000
Phasenverschiebung	18°
Erregerspannung	179,2 V
Erregerstromstärke	14,5 A
Leistung im Erregerstromkreise . .	2600 Watt

b) Gleichstrommaschine.

Mittlere Nutzspannung	242,4 V
Mittlere Nutzstromstärke	985 A
Mittlere Nutzleistung	238800 Watt
Erregerspannung	138 V
Erregerstromstärke	20,1 A
Effekt im Erregerstromkreise . . .	2750 Watt

c) Wirkungsgrad.

Nutzleistung des Umformers	238800 Watt
Verlust im Gleichstromanker . . .	6550
Verlust im Wechselstromanker . . .	9900
Erregereffekt für den Motor	2750
Erregereffekt für den Generator . .	2600
Leerlauf	22000

Gesammter eingeleiteter Effekt:

Berechnet	282600 Watt
Beobachtet	284000

Wirkungsgrad:

Berechnet	84,5 %
Beobachtet im Mittel	82,8
- - Maximum	83,8

Für 1 kg Kohle erhält man am Schaltbrett der primären Station eine Nutzleistung von 735 Wattstunden und am Schaltbrett der Unterstation eine solche von 585 Wattstunden.

Die Kraftübertragung Laucherthal - Sigmaringen. — Wenn bei Kraftübertragungen auf grosse Entfernungen das Wechselstromsystem vorzuziehen ist, so wendet man bei kleinen Entfernungen und nicht zu grossen Leistungen noch mit Vortheil das Gleichstromsystem an. Ein Beispiel hierfür ist die Kraftübertragung von Laucherthal nach Sigmaringen [1]), die von der Elektricitäts-Aktiengesellschaft, vormals Schuckert & Co., Nürnberg, eingerichtet worden ist. Auf der primären Station, wo eine Wasserkraft ausgenutzt wird, treibt eine Turbine mittels Riemenübertragung zwei Hauptschlussmaschinen an, die bei 460 Umdrehungen in der Minute je 61 A bei 1100 V erzeugen. Die Fernleitung ist nach dem Dreileitersystem an diese Maschinen angeschlossen und führt nach der 5 km entfernten sekundären Station, wo zwei vierpolige Umformer in Gang gesetzt werden. Dies sind Doppelmaschinen, die aus einem Hauptschlussmotor und einem Nebenschlussgenerator mit gemeinschaftlicher Achse bestehen, und ebenso wie die Generatoren der primären Station nach dem vierpoligen Aussenpoltypus konstruirt sind. Die Motoren werden jeder mit einem Strom von 70 A und 940 V gespeist und entwickeln etwa je 70 P, die direkt auf den Nebenschlussgenerator übertragen werden. Von diesem wird ein Strom von 170 A und 260 V hervorgebracht, der direkt zur Beleuchtung oder zum Laden von Akkumulatoren dient.

Die Hochspannungsanlage in Locle und Chaux de Fonds [2]). — Eine interessante Kraftübertragung mittels hochgespannten Gleichstroms ist ferner von der Cie. de l'Industrie Electrique in Genf für die Orte Chaux de Fonds und Locle in der Schweiz eingerichtet. Die Centrale liegt in Combe-Garrot, 20 km von Chaux de Fonds und 12 km von Locle entfernt, und wird nach völligem Ausbau neun Maschinensätze enthalten, von denen jeder aus einer 400pferdigen Turbine mit horizontaler Achse und aus einer sechspoligen Thury'schen Gleichstrommaschine für 150 A und 1800 V besteht. Sämmtliche Dynamomaschinen werden hintereinandergeschaltet und speisen einen 48 km langen Stromkreis, der die Motoren ebenfalls in Reihenschaltung enthält.

Die Schwierigkeiten dieses Systems liegen in der hohen Span-

---

[1]) Die elektrische Kraftübertragung von Laucherthal nach Sigmaringen für Licht- und Kraftzwecke. El. Zschr. 1894, S. 354.

[2]) Hecht, Electrician Bd. 88, S. 683. — El. Zschr. 1895, S. 90.

nung, die beim Zusammenarbeiten sämmtlicher Maschinen 14400 V beträgt, und in der Regulirung der Motoren auf konstante Geschwindigkeit.

Die Gefahren einer so hohen Spannung mögen auf den ersten Blick grösser erscheinen, als sie in Wirklichkeit sind. Die Spannung hat einmal nur zu der Zeit, wenn die Anlage voll belastet ist, ihren höchsten Werth, und zum andern lassen sich die Leitungen leicht so führen, dass nirgends zwei Punkte von der ganzen Spannungsdifferenz in gefährliche Nähe kommen. Die Maschinen und Leitungen müssen natürlich auf's Sorgfältigste isolirt sein, und auch die Konstruktion der Maschinen erfordert besondere Aufmerksamkeit. Der Ankerkern ist von der Achse isolirt; ferner ist die ganze Ankerwicklung mit Papier und gefirnisstem Zeug umgeben, damit keine Funken nach den Polschuhen überspringen können. Der Kommutator ist sorgfältig gearbeitet und mit Kohlenbürsten versehen, die Magnetwicklung besitzt hohe Isolation gegen das Maschinengestell. Die Maschinen selbst sind mit isolirenden Kuppelungen ausgerüstet und ruhen auf Tragbolzen, die in Porzellantöpfen eingeschwefelt sind. Diese sind ihrerseits wieder in ein Fundament aus schlecht leitendem, glasirten Material eingebettet. Unter diesen Umständen bilden nur die Klemmen der Dynamomaschinen und Motoren Punkte von erheblicher Spannungsdifferenz, und zwar beträgt sie bei erstern höchstens 1800 V und bei letztern erst 600 V, wenn sie 100 P liefern.

Die Schwierigkeiten, die hier benutzten Hauptstrommotoren auf konstante Geschwindigkeit zu reguliren, sind im 6. Kapitel behandelt. Im vorliegenden Fall hat man, um zunächst im Allgemeinen stabile Verhältnisse für die Motoren zu schaffen, die Turbinen und den rotirenden Theil der Dynamomaschinen möglichst leicht gewählt, sodass sie den Schwankungen im Energieverbrauch rasch folgen können und anderseits hat man die Motoren mit schweren Schwungmassen ausgerüstet. Zur feinern Regulirung der Motoren dienen jedoch Centrifugalregulatoren, die bei steigender Belastung Magnetwindungen ein- und im umgekehrten Fall ausschalten. Hierdurch soll verhütet werden, dass die Geschwindigkeitsänderungen bei Leerlauf und bei voller Belastung $^1/_2$ % überschreiten.

Dass die Cie. de l'Industrie Electrique die Schwierigkeiten, die dies System bietet, überwunden hat, dafür sprechen verschiedene nach demselben ausgeführte und sicher arbeitende Anlagen. Wir führen unter ihnen noch die ältere Anlage in Genua an, wo 1400 P auf 30 km übertragen werden, und die theilweise im Betrieb befindliche Anlage in Steinamanger (Ungarn), wo nach vollem Ausbau 1200 P bei 12000 V in einer 64 km langen Leitung zur Vertheilung gelangen werden.

Die Drehstromanlage in Bellegarde[1]. — Am Zusammenfluss der Rhone und Valsérine befindet sich bei Bellegarde schon seit längerer Zeit eine Turbinenanlage, die früher mittels Seilübertragung und neuerdings durch Elektricität verschiedene in der Nähe gelegene Fabriken mit Kraft versorgt. Da man die bestehenden Einrichtungen benutzen musste, hat die Einheitlichkeit der elektrischen Anlage gelitten. Wir wollen trotzdem näher auf sie eingehen, um die grossen, liegenden Drehstromgeneratoren mit rotirendem Magnetrade kennen zu lernen, die für direkten Antrieb durch Turbinen bestimmt sind.

Am obern Ende der bekannten „Perte du Rhone", wo sich das 1250 cbm in der Sekunde führende Flussbett auf 5 m einengt, ist ein Kanal abgezweigt, der in einen 550 m langen Tunnel von 56 qm Querschnitt ausläuft. Dieser mündet 1 m tiefer am Zufluss der Valsérine in ein 1500 cbm fassendes Sammelbecken, dessen Niveau bei Hochwasser 10 m und bei niedrigem Wasserstande 12 m über dem Rhone-Spiegel liegt. Von der Valsérine ist das Becken durch eine Steinmauer, von der Rhone durch das Turbinenhaus getrennt. Bei hohem Wasserstande sind 10000 P, bei niedrigem 7200 P verfügbar.

Die vorhandene Anlage umfasst drei Jonval-Reaktionsturbinen, zwei zu 800 und eine zu 600 P, von denen die eine grosse und die kleine mit Drehstrommaschinen von Brown, Boveri & Co., Baden (Schweiz) direkt gekuppelt sind. Zwei ähnliche Maschinensätze zu je 1200 P sind in Aufstellung begriffen.

Die Brown'schen Drehstrommaschinen für direkten Antrieb durch Turbinen (Fig. 140) besitzen ein rotirendes Magnetrad, das auf die vertikale Turbinenachse aufgekeilt ist und von dem feststehenden Ringanker umschlossen wird. Das stählerne Magnetrad ist aus einem Stück gegossen und ähnelt einem aufgespannten Schirmgestell, da zur bessern Ausbalancirung der Achse die Nabe des Rades höher als der Radkranz liegt. Auf diesem sind cylindrische Stücke

---

[1] Du Riche-Preller, Engineering Bd. 63, S. 633 u. 701.

aus Schmiedeeisen verschraubt, die Spulen tragen und abwechselnd entgegengesetzte Polarität haben. Der Anker wird wie üblich aus

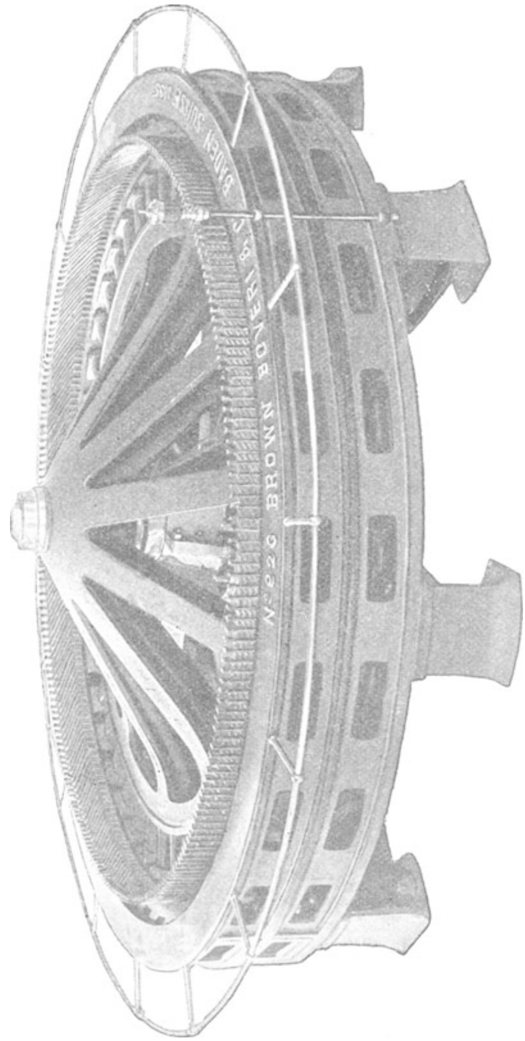


Fig. 140.

schmiedeeisernen Blechen zusammengesetzt und durch einen gusseisernen Rahmen zusammengehalten. Er bildet einen Ring, der die ganze Maschine einschliesst, und ruht auf Füssen, die auf dem Fundament verschraubt sind. An der Innenseite besitzt der Anker Bohrungen zur Aufnahme von Drähten in isolirenden Röhren.

Die grössere der beiden in Bellegarde aufgestellten Maschinen dieser Konstruktion besitzt 44 Pole und macht 130 Umdrehungen in der Minute, was 47,5 Perioden in der Sekunde entspricht. Sie

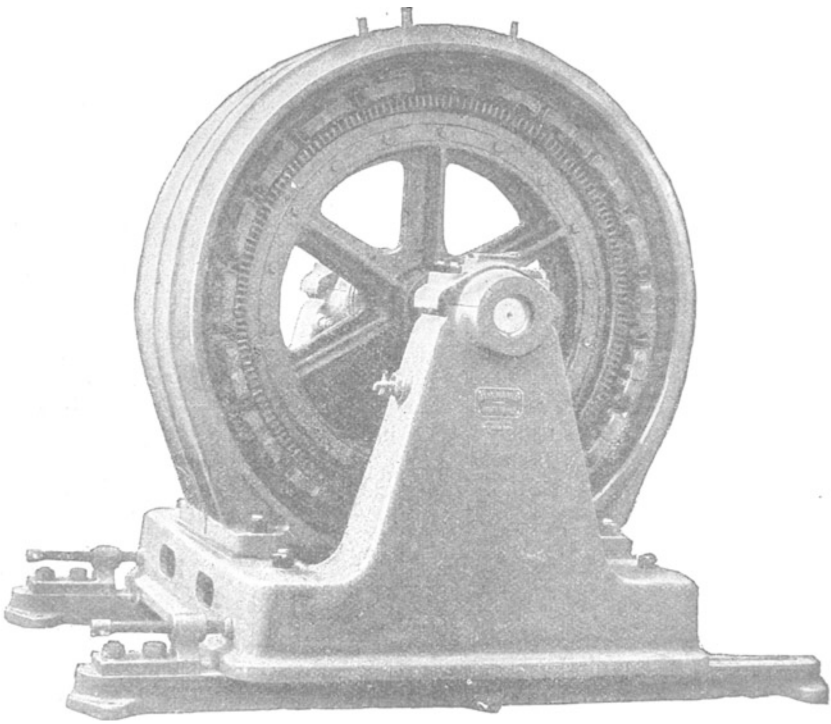


Fig. 141.

liefert in jeder Phase 1050 V und 400 A, also 590 Kilowatt, wenn der Kosinus der Phasenverschiebung 0,80 beträgt. Zur Erregung sind 10 Kilowatt erforderlich, die von einer besonders angetriebenen Maschine geliefert werden. Der Wirkungsgrad der Drehstrommaschine ist einschliesslich der Erregung 93 %. Das Magnetrad hat einen Durchmesser von 3,85 m, der des Ankers beträgt, aussen gemessen, 4,6 m. Das Gesammtgewicht der Maschine ist 22 t, sodass also etwa 40 kg auf ein Kilowatt entfallen. Die neu aufzustellenden Maschinen werden bei 42 t Gewicht 2000 V und 320 A, also 880 Kilowatt liefern, wenn der Kosinus der Phasenverschiebung 0,80 ist. Der Durchmesser des Magnetrades wird 5 m, der des Ankers 6 m sein.

Die Anlage giebt zur Zeit an sechs Fabriken elektrische Energie ab, die bis zu 1300 m entfernt liegen. Die bedeutendste unter ihnen ist eine Weberei, mit zwei 120pferdigen Elektromotoren Brown'scher Konstruktion und einem solchen für 15 P. Die erstern sind durch Fig. 141 dargestellt und dienen zum Antrieb der Wellen in den Fabriksälen. Die Webemaschinen erfordern nämlich einen durchaus gleichförmigen Gang, sodass von der Aufstellung von Einzelmotoren abgesehen werden musste. Die grossen Motoren wiegen 5,8 t, verbrauchen 80 A bei 1000 V und machen 350 Umdrehungen in der Minute. Sie besitzen Schleifringe zur Einfügung von Widerständen in die Ankerkreise beim Angehen.

Die Drehstromanlage in Rheinfelden[1]). — Zum Schluss soll noch eine Anlage besprochen werden, die allerdings erst im Entstehen begriffen ist, aber die bedeutendste Kraftübertragungsanlage Deutschlands zu werden verspricht. Es sind die Kraftübertragungswerke in Rheinfelden, wo 15000 P des Rheins für ein Vertheilungsgebiet von 20 km Radius nutzbar gemacht werden sollen.

Quer durch den Fluss, der hier in der Sekunde 350 cbm Wasser befördert und auf 2,4 km ein Gefälle von 6,6 bis 7,5 m hat, ist ein Stauwehr errichtet. Vor diesem zweigt ein 50 m breiter und 900 m langer Oberwasserkanal ab, den eine 7 m hohe Steinmauer von dem Strom trennt. Die Turbinenanlage durchsetzt den Kanal schräg zu seiner Mittellinie und trennt ihn von dem etwa 100 m langen Unterkanal, dessen Niveau bei Hochwasser 2,5 bis 3 m, bei Niedrigwasser 5 m unter dem des Oberwasserkanals liegt. Das Turbinenhaus enthält 20 Kammern mit je 6,75 m Achsenabstand. In jeder befindet sich eine 840pferdige Francis-Turbine von Escher, Wyss & Co. mit zwei Lauf- und zwei Leiträdern und mit äusserer Beaufschlagung.

Der elektrische Theil der Anlage wird von der Allgemeinen Elektricitäts-Gesellschaft, Berlin, ausgeführt, die für die vorliegenden Verhältnisse das Drehstromsystem gewählt hat. Die Generatoren, nach dem Induktortypus mit fester Anker- und Magnetwicklung

[1]) Rathenau, El. Zschr. 1896, S. 402.

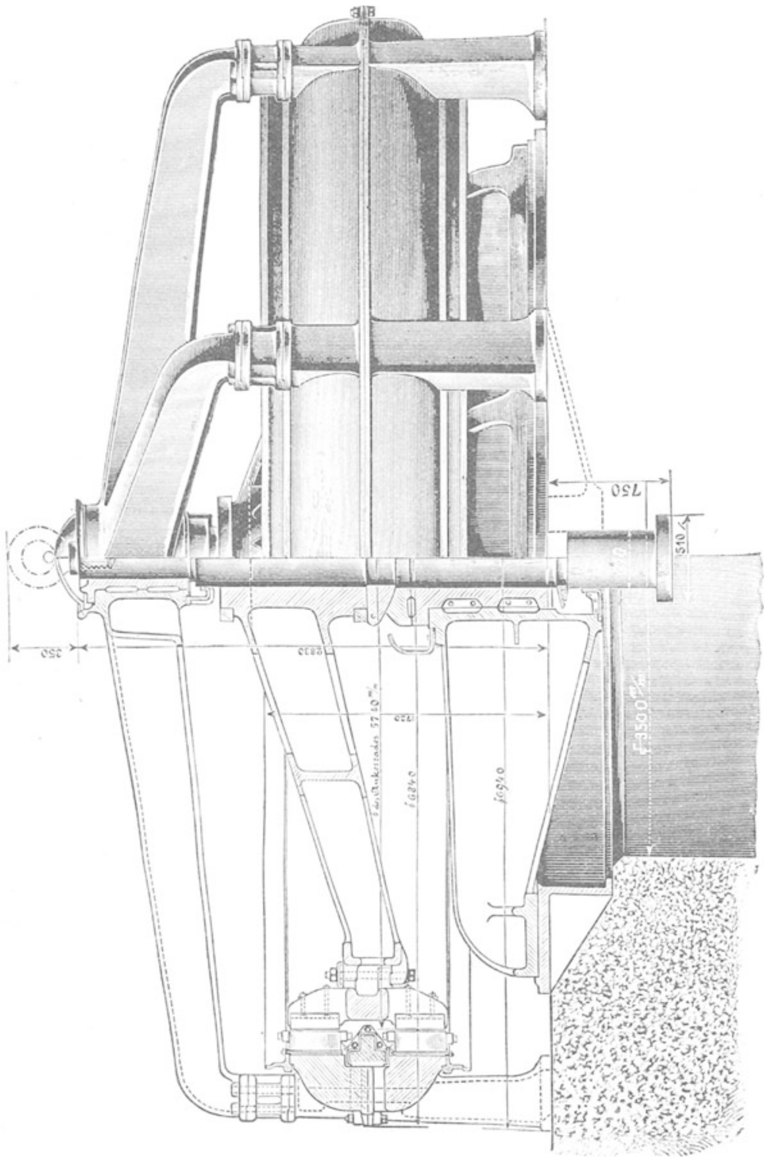


Fig. 142.

gebaut, werden liegend angeordnet und direkt mit den Turbinen gekuppelt. Fig. 142 zeigt den ganzen Aufbau der Dynamomaschine, deren Abmessungen in Millimeter eingetragen sind; Fig. 143 bringt die Einzelheiten des Ankers und des Induktorrades zur Darstellung. Das ganze Gewicht der Turbinen (35 t) und des Induktorrades (20 t) ruht auf zwei zu beiden Seiten seiner Nabe angebrachten Kammlagern, zu deren Entlastung Oel unter Druck eingeführt wird. Das

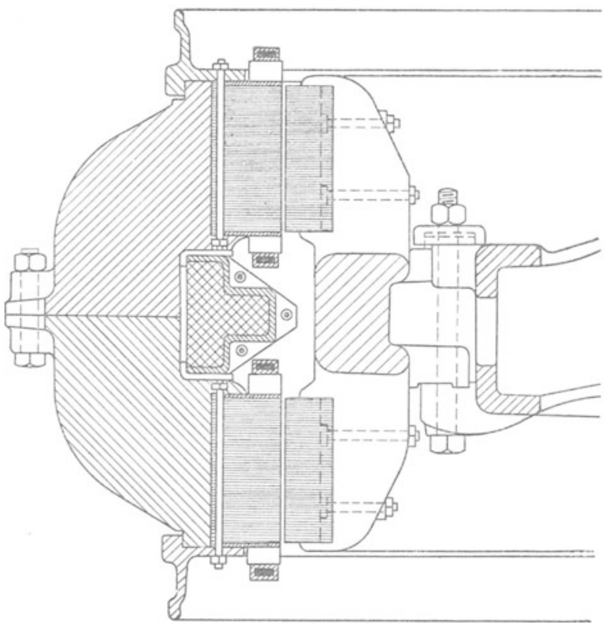


Fig. 143.

Induktorrad besteht aus fünf Segmenten und trägt an seinem Umfang 55 senkrecht verlaufende Jochstücke mit zahnartigen Vorsprüngen aus untertheiltem Eisen. Es rotirt innerhalb eines gusseisernen Gehäuses, das den Anker bildet und auf hohen Füssen ruht, sodass auch während des Betriebes die Bedienung des untern Kammlagers möglich ist.

Das Gehäuse beseht aus zwei aufeinander geschraubten Hälften, die des bessern Transportes wegen in radialer Richtung viermal getheilt sind. An der Innenseite befinden sich den Vorsprüngen der

Jochstücke gegenüber (Fig. 143) zwei Ringe aus übereinandergelegten Eisenblechen, die durch Messingplatten zusammengehalten und an dem gusseisernen Gehäuse befestigt sind. Die Ankerbleche sind so geformt, dass die Ringe 165 über das Gehäuse hervortretende Zacken bilden, auf die die Ankerspulen mit Mikauitisolation gesetzt sind. Zwischen den beiden Ringen liegt die Magnetwicklung, eine grosse Spule vom Durchmesser des Ankers mit horizontaler Windungsfläche. Die Kraftlinien verlaufen also um die Spule herum und werden durch Jochstücke des Induktorrades geschlossen. Der Magnetismus ist demzufolge längs der Ankerringe verschieden vertheilt: an den Stellen, die den Jochstücken gegenüberliegen, hat er seine grösste, an den dazwischenliegenden Stellen seine geringste Stärke. Beim Rotiren des Induktorrades kommen daher die in den Ankerringen eingebetteten Spulen abwechselnd in Felder verschiedener Stärke und werden so der Sitz von elektromotorischen Kräften.

Die für Rheinfelden bestimmten Maschinen dieses Systems werden 55 Umdrehungen in der Minute machen und in jeder Phase 63 A und 3800 V bei 55 Perioden in der Sekunde liefern. Diese Periodenzahl wurde gewählt, weil die Anlage gleichzeitig Licht- und Kraftzwecken dienen soll; für reinen Kraftbetrieb hätte man sie niedriger nehmen können. Die Spannung zwischen je zwei Leitungen beträgt unter diesen Umständen 6600 V und soll, wenn das Vertheilungsnetz grössere Ausdehnung gewinnt, durch Transformatoren auf 16500 V erhöht werden. Die Maschinen leisten also unter der Annahme, dass der Kosinus der Phasenverschiebung 0,80 ist, 580 Kilowatt. Sie werden beim Angehen durch eine kleine Akkumulatorenbatterie erregt; während des Betriebes werden diese durch einige Umformer unterstützt, die Wechselstrom in Gleichstrom verwandeln. Der Wirkungsgrad der Maschinen beträgt einschliesslich der Erregung 92 %.

Die Vertheilungsleitungen werden blank geführt und auf dreifachen Glockenisolatoren an Holzmasten mit Eisentraversen befestigt. Die Hauptkonsumstellen werden durch Ausgleichsleitungen verbunden, denen der Strom an den Schwerpunkten des Verbrauchs zugeführt wird. Die Leitungen sind so bemessen, dass es bei völligem Ausbau der Anlage möglich sein wird, den Glühlampen die Leistung der Turbinenwelle mit 28 % und den Motoren mit 35 % Verlust zuzuführen.

Sachregister.