

Elektrische Kraftübertragung

von

Gisbert Kapp

Elektrische Kraftübertragung.

Ein

Lehrbuch für Elektrotechniker

VON

Gisbert Kapp, C. E.

Associate Member of the Institution of Civil Engineers, Member of the Institution of
Electrical Engineers.

Autorisirte deutsche Ausgabe,

nach der dritten englischen Auflage bearbeitet

VON

Dr. L. Holborn

und

Dr. K. Kahle.

Mit zahlreichen in den Text gedruckten Figuren und 4 Tafeln.

Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH
1891

Additional material to this book can be downloaded from <http://extras.springer.com>

ISBN 978-3-642-49443-7 ISBN 978-3-642-49722-3 (eBook)

DOI 10.1007/978-3-642-49722-3

Reprint of the original 1st edition 1891

Vorwort.

Im vorliegenden Buche übergeben wir dem deutschen Publikum eine Uebersetzung von Gisbert Kapps „Electric Transmission of Energy“, welche eine in unserer Litteratur fühlbare Lücke ausfüllen wird. Denn obgleich die elektrische Kraftübertragung zur Zeit dasjenige Gebiet der Elektrotechnik ist, welches das lebhafteste Interesse in Anspruch nimmt, so fehlte es uns doch bisher an einer zusammenhängenden Darstellung von berufener Seite, welche dies Gebiet behandelt. Die Verdienste des Verfassers um die Entwicklung der Elektrotechnik sind so allgemein bekannt und gewürdigt, dass wir ihm für die Mittheilung seiner Anschauungsweise über die elektrische Kraftübertragung grossen Dank schulden. Zugleich bringt das Werk die grundlegenden Gesetze für die Wirkung der Dynamomaschinen und eine umfassende Beschreibung der gebräuchlichen Maschinentypen, aus welcher man die für ihre Construction wichtigsten Grundsätze entnehmen kann. Von einer Behandlung des Wechselstroms wurde abgesehen, da über seine Verwendung zu Zwecken der elektrischen Kraftübertragung noch nicht die nöthigen Erfahrungen vorliegen. Die grundlegenden Fragen bleiben jedoch für Gleich- und Wechselstrom dieselben, so dass auch bei Verwendung des letzteren das vorliegende Buch von Vortheil sein wird.

Die Uebersetzung schliesst sich überall an das Original an. Nur in den Kapiteln über Leitungen, Dynamomaschinen

und elektrische Bahnen war eine grössere Berücksichtigung der deutschen Technik geboten. Auf Grund der Angaben, welche uns die betreffenden Firmen in dankenswerther Weise zur Verfügung stellten, haben wir hier die nöthigen Zusätze gemacht.

Die Figuren sind, soweit es anging, dem englischen Original entnommen. Einige mussten wegen des eingedruckten englischen Textes neu gezeichnet werden. Figuren 78 bis 80 stammen aus einer Abhandlung von Grief (Elektr. Z.).

Die Angaben in englischen Masseneinheiten sind überall umgerechnet worden.

Charlottenburg, September 1891.

L. Holborn, K. Kahle.

Inhalts-Verzeichnis.

	Seite
Vorwort	III
Einleitung	1
Kapitel I	8
Allgemeine Principien. — Kraftlinien. — Beziehung zwischen mechanischer und elektrischer Energie. — Absolutes Masssystem. — Idealer Motor und ideale Kraftübertragung — Technische Einheiten.	
Kapitel II	40
Der erste Elektromotor. — Die Forbes'sche Dynamomaschine. — Die ideale Wechselstrommaschine. — Die ideale Gleichstrommaschine — Der Siemens'sche Γ -Anker. — Selbstinduktion. — Versuche mit Elektromotoren. — Der Hefner-Alteneck'sche Trommelanker. — Der Gramme'sche Ringanker. — Der Pacinotti'sche Ringanker. — Die elektromotorische Kraft des Ankers.	
Kapitel III	68
Umkehrung der Dynamomaschine. — 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.	
Kapitel IV	81
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. — Kurven, längst denen die Anzahl der Pferdestärken konstant ist. — Geschwindigkeitscharakteristiken. — Anwendung auf elektrische Bahnen. — Statische und dynamische elektromotorische Kraft und Gegenkraft.	
Kapitel V	120
Graphische Behandlung der Probleme. — Maximale äussere Energie. — Maximaler theoretischer Wirkungsgrad. — Bestimmung der günstigsten Geschwindigkeit für den maximalen wirtschaftlichen Wirkungsgrad. — Aenderung der Geschwindigkeit bei Nebenschlussmotoren. — Die Compoundmaschine als Generator. — Kraftübertragung bei konstanter Geschwindigkeit. — Praktische Schwierigkeiten.	
Kapitel VI	131
Die verschiedenen Systeme der elektrischen Kraftübertragung. — Uebertragung bei konstanter Spannung. — Mechanisch regulirte Motoren. — Selbstregulirende Motoren. — Uebertragung bei konstanter Stromstärke. — Schwierigkeit der Selbstregulierung. — Kraftübertragung auf	

	Seite
grosse Entfernung. — Stromverlust durch Nebenschluss. — Theorie. — Wirtschaftlicher Wirkungsgrad. — Bedingungen für den höchsten wirtschaftlichen Wirkungsgrad. — Selbstregulirung auf konstante Geschwindigkeit. — Praktisches Beispiel.	
Kapitel VII.	164
Die Leitung. — Beziehung zwischen Anlagekapital und Energieverlust. — Wirtschaftlich günstigster Querschnitt. — Formel für die maxi- male Stromstärke. — Formel für die mittlere Stromstärke. — Tafeln zur Bestimmung des wirtschaftlich günstigsten Querschnitts. — Er- wärmung der Leiter. — Tafeln für die Temperaturzunahme.	
Kapitel VIII	175
Leitungen für elektrische Kraftübertragung. — Leitungen für elektrische Kraftvertheilung. — Einfluss der Isolation bei verschiedenen Span- nungen. — Luftleitungen. — Isolatoren. — Befestigung der Leitungen an den Isolatoren. — Verbindungen. — Material für Luftleitungen. — Kostenanschlag für eine Luftleitung. — Blitzableiter. — Unterirdische Leitungen. — Edinsson'sche Kabel. — Das Dreileitersystem. — Verschie- dene Systeme für unterirdische Leitungen. — Siemens'sche Bleikabel.	
Kapitel IX	204
Das Anwendungsgebiet der elektrischen Kraftübertragung. — Ver- gleichung mit anderen Systemen. — Die Untersuchungen von Beringer. — Hydraulische Uebertragung. — Pneumatische Uebertragung. — Drahtseilübertragung. — Vergleichende Tabellen für den Wirkungs- grad und die Kosten. — Schlussfolgerungen für die Praxis.	
Kapitel X	219
Eintheilung der Dynamomaschinen. — Die Dynamomaschinen von Edison-Hopkinson, von Thomson-Houston, von Immisch, von Laurence, Paris und Scott, vom Manchester-Typus, von Elwell-Parker, von Crompton, von Andrews, von Goolden, vom Phönix-Typus, von Kapp, von Brown, von Siemens & Halske, von Schuckert, von der Allge- meinen Electricitäts-Gesellschaft und von den deutschen Electricitäts- werken.	
Kapitel XI	271
Historische Bemerkungen. — Die Entdeckung von Fontaine. — Der Bericht von Figuier. — Das Pinkus'sche Patent. — Die ersten Elek- tromotoren. — Die von Page angelegte elektrische Bahn. — Ein mittelst Electricität betriebener Pflug. — Elektrische Aufzüge, Ven- tilations- und Pumpanlagen. — Die verschiedenen Systeme der neueren elektrischen Strassenbahnen. — Vergleich zwischen Batterie- und Leitersystem. — Die elektrischen Bahnen der Firma Siemens & Halske und der Thomson-Houston-Company. — Die elektrischen Strassen- bahnen bei Breesbrook-Newry und Blackpool. — Die Telpher-Linie bei Glynde. — Der elektrische Strassenbahnwagen von Reckenzaun. — Vergleich zwischen Betrieb mittelst Pferden und mittelst Electricität.	
Kapitel XII	296
Die Entwicklung der Elektrischen Kraftübertragung in der Schweiz. — Aufzählung der einzelnen Anlagen. — Die elektrische Kraftüber- tragung von Kriegstetten-Solothurn und die Ergebnisse ihrer Prüfung. — Die Anlage von Aichberg. — Der neueste Typus der Brown'schen Dynamomaschine.	

Einleitung.

Die Uebertragung und Umsetzung von Energie ist die Hauptaufgabe der Maschinentchnik. Keine der bis jetzt erfundenen Maschinen kann Energie erzeugen, alle sind vielmehr nur dazu bestimmt, die in der Natur in mehr oder weniger passender Form vorhandene Energie für nützliche Zwecke zu übertragen oder umzusetzen. Je vollkommener unsere Maschinen sind, um so mehr sind sie dazu geeignet, die Kräfte der Natur so zu verwandeln, dass sie nützliche Arbeit leisten. In diesem Sinne muss man die elektrische Kraftübertragung als eine Verbesserung der schon vorhandenen rein mechanischen Methoden betrachten. Aber sie leistet noch mehr. Sie verbessert nicht allein die mechanischen Methoden, sondern erweitert auch ihr Anwendungsgebiet, da sie in vielen Fällen näher an die Kraftquellen reicht, als die mechanischen Vorrichtungen.

Die wichtigsten natürlichen Kraftquellen sind Feuer, Wind und Wasser. Was die erste betrifft, so ist die elektrische Kraftübertragung kaum von grosser Bedeutung, wenn es sich darum handelt, die Kraftquelle für entferntere Plätze nutzbar zu machen. Denn das Feuerungsmaterial ist in Form von Kohle so leicht zu transportieren, dass es in den meisten Fällen zweckmässiger ist, diese nach demjenigen Ort zu bringen, wo man die Energie braucht, als erstere an dem Fundorte in Energie umzuwandeln und diese alsdann nach der Verwendungsstelle zu übertragen. Es ist vorgeschlagen worden, dicht bei den Kohlenbergwerken grosse Stationen zu errichten, welche Elektrizität erzeugen, und die Dynamomaschinen durch Dampfkraft zu treiben, welche durch Kohlenabfälle erzeugt wird, da für diese ein Eisenbahntransport meistens nicht lohnt. Der erzeugte Strom könnte alsdann in Drahtleitungen nach Plätzen geführt werden, wo man Kraft braucht, und es würde so selbst diejenige Energie nutzbar gemacht, welche in den Abfällen unserer

Kohlenlager enthalten ist. Bis jetzt ist dieser Vorschlag noch nicht in grossem Massstabe praktisch ausgeführt. Allerdings wird an zwei Orten Triebkraft unmittelbar in der Nähe von Kohlenbergwerken erzeugt, um in dem einen Falle eine elektrische Eisenbahn in der Kohlengrube, in dem anderen eine oberirdische Bahnlinie damit zu versorgen.

Die beiden anderen Naturkräfte, Wind und Wasser, besonders die letztere, bieten für die Verwendung der Elektrizität ein weites Feld. Die Wasserkraft ist nur in sehr beschränkter Masse übertragbar. Die grosse Kostspieligkeit von Kanälen und die Schwierigkeit, hoch gelegene Wasserbehälter dicht bei den Plätzen zu errichten, wo die Kraft am meisten gebraucht wird, zwingen uns, in den meisten Fällen unsere Werkstätten an die natürlichen Wasserfälle zu verlegen. Mit anderen Worten, wir können die Wasserkraft nicht an die Verbrauchsstelle bringen, wir lassen also die Arbeitsmaschine da arbeiten, wo die Wasserkraft sich befindet. Wo dies unmöglich oder unzweckmässig ist, kann die Wasserkraft nicht direkt nutzbar gemacht werden. In diesem Falle ist die elektrische Kraftübertragung insofern von sehr grossem Werth, als wir mit ihrer Hülfe viele Energiequellen erreichen können, welche sonst ohne Nutzen sein würden. Der Energievorrath der Wasserfälle der Erde ist enorm. Wir wollen nur zwei Beispiele anführen. Nach Japing ist das Gewicht des Wassers, welches stündlich den Niagarafall hinabstürzt, einhundert Millionen Tonnen, welches ungefähr eine Energie von sechzehn Millionen Pferdekräften darstellt, und die gesammte Produktion an Kohle auf der Erde würde ungefähr gerade hinreichen, um das Wasser wieder in die Höhe zu pumpen. Chretien, ein französischer Ingenieur, giebt in einem Bericht, den er auf der Pariser elektrischen Ausstellung im Jahre 1881 vortrug, die gesammte Wasserkraft in Frankreich zu siebzehn Millionen Pferdekräften an, und er meinte, dass, wenn durch elektrische Kraftübertragung nur ein Theil dieses ungeheuren Energievorraths nutzbar gemacht werden würde, man eine bedeutende Ersparnis an Feuerungsmaterial in Frankreich erzielen könnte. Die für die elektrische Kraftübertragung nothwendigen Umbauten der Flussläufe würden gleichzeitig Ueberschwemmungen verhindern oder wenigstens mildern. In der Schweiz hat die Ausnutzung der Wasserkraft mittelst elektrischer Kraftübertragung die besten Aussichten. Denn dieses Land ist nicht allein reich an Wasserfällen, welche zur Sommerzeit keine grosse Verringerung ihrer

Wasserfälle erleiden, wie es bei Flussläufen in nicht alpinen Gegenden der Fall ist, es ist auch die Kohle theuer, das Holz spärlich, und die dichte Bevölkerung lebt meistens von der Industrie. Wir haben hier Bedingungen, welche alle für die Annahme einer neuen und besseren Methode der Kraftübertragung günstig sind. In der Schweiz hatte vor dreissig oder vierzig Jahren die Kraftübertragung mittelst mechanischen Vorrichtungen zuerst einen praktischen Erfolg, in diesem Lande hat sich auch die elektrische Kraftübertragung zuerst entwickelt. Die gesammte Energie, welche in allen verschiedenen Anlagen für Kraftübertragung im Anfang dieses Jahres in der Schweiz erzeugt wurde, kann auf 1500 Pferdekräfte veranschlagt werden.

In Grossbritannien findet die elektrische Uebertragung der Wasserkraft kein so grosses Anwendungsgebiet, besonders weil es nur wenige Wasserfälle mit grossem Energievorrath giebt, welche nicht schon nutzbar gemacht worden sind. Die beiden bedeutendsten Beispiele für elektrische Kraftübertragung sind hier elektrische Eisenbahnen.

In Portrush in Irland setzt man mittelst einer Turbine und einer Dynamomaschine die Energie einer Wasserkraft um, welche in den Schienen zu dem Motor des Wagens geführt wird. Hier wird sie wieder in mechanische Energie verwandelt und dazu verwendet, den Wagen fortzubewegen. Eine ähnliche Anlage existirte in Newry, wo die lebendige Kraft des Camloughflusses dazu dient, eine elektrische Eisenbahn zwischen Newry und Bessbrook zu treiben. Es giebt ausserdem noch einige andere Beispiele, wo entweder Wasser- oder Dampfkraft in elektrische Energie verwandelt wird, aber im Allgemeinen ist der Fortschritt in dieser Richtung langsam. Der Grund hierfür liegt darin, dass Anlagen dieser Art nothwendig ziemlich gross sein müssen und nicht als blosser Experimente unternommen werden können. Wenn eine kleine elektrische Beleuchtungsanlage in einem besonderen Falle fehlschläge, so würde der Verlust des Unternehmers nicht sehr ernstlich sein. Die Dynamomaschine, der Leitungsdraht und die Lampen haben alle ihren bestimmten Werth, und wenn sie bei der einen Anlage überflüssig sind, können sie bei einer anderen verwendet werden. Bei einer Kraftübertragung von einer bisher unzugänglichen Quelle verhält es sich anders. Die Dynamomaschine und der Motor müssen für jeden einzelnen Fall besonders konstruirt werden, und die Wahrscheinlichkeit, dass sie an anderer Stelle benutzt

werden können, ist gering. Die Leitungen und ihre Träger verursachen gleichfalls Ausgaben, sie sind aber nur für denjenigen Ort von Werth, wo sie zuerst errichtet wurden. Ferner haben die Anlagen, welche nöthig sind, um die natürliche Energie so zu verwandeln, dass sie die den Strom erzeugende Dynamomaschine treiben kann, gleichfalls nur einen lokalen Werth. In solchen Fällen muss entweder die Anlage von vollständigem Erfolg begleitet sein, oder es sind die Ausgaben dafür ganz nutzlos weggeworfen. Es ist daher natürlich, dass Kapitalisten davor zurückschrecken, Unternehmungen zu unterstützen, so lange diese sich noch im Stadium des Versuches befinden.

Ein anderer Grund, weshalb in England wenigstens die Anlagen für elektrische Kraftübertragung noch vereinzelt dastehen, liegt darin, dass in diesem Lande die Kohle billig und die Wasserkraft selten ist. In der Schweiz und Frankreich ist es anders, und demgemäss finden wir, dass die ersten Versuche in grossem Massstabe in dem letzteren Lande angestellt worden sind. Wenn man auch Marcel Deprez nicht mit Recht als den Erfinder der elektrischen Kraftübertragung oder eines Systems derselben bezeichnen kann, wodurch sie für diese Praxis brauchbar wurde, so ist er doch der erste gewesen, welcher zeigte, dass Energie auf weite Entfernungen mittelst des elektrischen Stromes übertragen werden kann. Dass seine kostspieligen Experimente einfach misslangen, thut seinem Verdienst keinen Abbruch, die Bedeutung der hohen Spannung zuerst erkannt und die allgemeine Aufmerksamkeit auf diesen Zweig der Elektrotechnik gelenkt zu haben. Diejenigen, welche er durch sein Vorgehen zu ähnlichen Untersuchungen veranlasste, waren Praktiker, welche kein besonderes System vorzogen. Ihren Bemühungen gelang es, die Aufgabe, Energie auf weite Entfernungen zu übertragen, mit Erfolg zu lösen.

Im Allgemeinen ist die elektrische Kraftübertragung für zwei Verwendungsarten von grossem Werth. Die eine umfasst alle Fälle, wo, wie wir oben zeigten, bisher unbenutzte Quellen natürlicher Energie mit ihrer Hülfe nutzbar gemacht werden; um die andere handelt es sich, wenn die Quelle der Energie selbst zugänglich ist, aber wenn man diese über eine Zahl von einander unabhängiger Punkte vertheilen will, damit sie dort Nutzarbeit leistet. Im ersten Falle müssen wir einen grossen Betrag von Energie, gleichsam in einem Stück, von einer entfernten Quelle nach dem Arbeitsplatz

übertragen; im zweiten Falle müssen wir die Energie der Quelle von vornherein in eine Zahl kleiner Stücke zerlegen und diese über einen bestimmten Bereich vertheilen, damit sie Nutzarbeit leisten. Hierbei tritt die elektrische Kraftübertragung mit den mehr mechanischen Mitteln der Riemen, Wellen und Drahtseile, sowie der pneumatischen und hydraulischen Röhrenleitungen in Wettkampf, und die Frage, ob das eine oder das andere dieser Systeme vorzuziehen ist, hängt von der Menge der zu übertragenden Energie, der Entfernung und manchen anderen lokalen Umständen ab. Die Elektrizität hat den grossen Vorzug, dass sie äusserst leicht zu übertragen ist, da man sowohl ihre Richtung als ihre Intensität mit grösster Leichtigkeit ändern kann. Man vermag keine mechanische Kraft in dem die Elektrizität führenden Leiter zu entdecken, wie es bei rein mechanischen Uebertragungen mittelst Riemen, Wellen und Drahtseilen oder in Röhren, welche zur Fortleitung von Dampf, Wasser und Luft dienen, der Fall ist. Der Elektrizitätsleiter erfährt keine Verunreinigung, keine Erwärmung und keine Bewegung. Man kann ihn biegen und in mancherlei Art bewegen, während er viele Pferdekkräfte 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 anderen kleinen Hausgeräths zu liefern. Dabei ist die Kraft, welche an der als Generator wirkenden Dynamomaschine angewendet wird, immer der Kraft proportional, welche alle Motoren abgeben, sodass keine Energie verschwendet wird, wenn ein Theil der Motoren stillsteht oder mit nicht voller Belastung arbeitet. Ausser diesen Vortheilen hat die elektrische Energievertheilung den Vorzug, dass sie einen grossen Wirkungsgrad hat. Der wirthschaftliche Wirkungsgrad der Dynamomaschine und Elektromotoren ist selten kleiner als 80 Proc. und steigt in vielen Fällen bis auf 95 Proc., so dass selbst, wenn

wir einen grossen Energieverlust in den Leitungsdrähten zulassen, 60 Proc. der für die Erzeugung des Stromes aufgewandten Arbeit von den Motoren geleistet werden, die über ein beschränktes Gebiet vertheilt sind. So könnte z. B. eine Dampfmaschine von 100 P.-S., welche eine Dynamomaschine im Mittelpunkt eines Gebiets von 3 km Durchmesser treibt, insgesamt 60 P.-S. an sechzig verschiedenen Punkten innerhalb dieses Gebiets liefern. Abgesehen von dem Aufwand, welchen die Wartung von sechzig verschiedenen kleinen Dampfmaschinen verursacht, die, über den ganzen Distrikt vertheilt, an Stelle der Elektromotoren gebraucht würden, ist es klar, dass wir 100 P.-S. mittelst einer Maschine mit weniger Aufwand an Feuerungsmaterial erzeugen können, als bei den kleinen Maschinen nöthig wäre, und wenn auch die doppelte Umsetzung, welche durch die elektrische Vertheilung der Energie nöthig wird, etwas Verlust mit sich bringt, so ist doch noch im Allgemeinen das System wirthschaftlich besser.

In manchen Fällen hat man es zweckmässig gefunden, die Energie von der primären Dynamomaschine nicht direkt nach den Motoren zu führen, sondern zwischen beiden noch eine Akkumulatorenbatterie einzuschalten. Hierdurch wird das Anwendungsgebiet des Systems offenbar vergrössert: man hat alsdann den doppelten Vortheil, dass Triebkraft selbst dann vorhanden ist, wenn der Generator stillsteht, und dass ferner der Motor in gewissem Masse transportfähig wird. Die elektrische Kraftübertragung ist dann auch über den festen Leiter hinaus noch möglich, ja sie kann überhaupt ohne Hülfe eines Leitungsdrahtes ausgeführt werden. Als Beispiel hierfür können wir die Strassenbahnwagen anführen, die mittelst sekundärer Batterien angetrieben werden. Wir haben hier an irgend einer Stelle in der Nähe der Bahnlinie eine Station, wo die Dynamomaschinen und ihre Antriebsmaschinen stehen und wo der Strom durch ein Paar Kabel nach den sekundären Batterien des Wagens geleitet wird, um sie zu laden. Es ist dies die erste Stufe der elektrischen Kraftübertragung. Wenn die Zellen vollständig geladen sind, werden die Kabel ausgeschaltet, und der Wagen kann abfahren. Während seiner Fahrt findet die zweite Stufe der Uebertragung statt, die Energie geht von den Zellen auf den Motor über. Durch die Verwendung von sekundären Batterien können wir auf die Weise die Uebertragung über die Grenzen der Kabel hinaus fortsetzen. Wenn die Wagen in die Station, wo geladen wird, selbst hineinfahren können, so kann

der Process des Ladens dadurch beschleunigt werden, dass man Vorrichtungen trifft, um die Zellen aus dem Wagen herauszunehmen und sie zu laden, während der Wagen, mit einer zweiten Batterie versehen, wieder abfährt. Auf diese Weise kann bei jedem Wagen unmittelbar nach seiner Ankunft die erschöpfte Batterie durch eine frisch geladene ersetzt werden, so dass er seine Fahrt sofort wieder aufnehmen kann. In diesem Falle findet die wirkliche Kraftübertragung zwischen der Dynamomaschine und den Zellen, welche dicht bei einander stehen, nur über eine Entfernung von wenigen Metern statt; später jedoch kann die Energie über eine sehr weite Entfernung hin nutzbar gemacht werden.

Ein ähnliches System ist im Gebrauch, um kleine Boote mittelst Elektrizität zu treiben. Es kann sehr zweckmässig bei Fahrzeugen angewandt werden, die zu grösseren Schiffen gehören, wenn diese mit elektrischer Beleuchtung versehen sind. Denn dieselbe Dynamomaschine, welche Abends die Glühlampen speist, kann Tags über zum Laden der Akkumulatoren des Boots verwandt werden, so dass dieses, auf ein plötzliches Signal hin in die See hinabgelassen, mit einem hinreichenden Vorrath von Energie versehen ist, um eine Fahrt von einigen Stunden zu machen. Wenn das Boot nicht gebraucht wird, können seine Akkumulatoren auch dazu dienen, das Schiff zu beleuchten, falls die Dynamomaschine schadhaf geworden ist oder aus irgend einem anderen Grunde nicht gehen kann.

Beispiele dieser Art könnten wir beliebig vervielfältigen, aber die angeführten mögen hinreichen, um zu zeigen, dass bei dem gegenwärtigen Stande der Elektrotechnik die elektrische Kraftübertragung eine Frage von grossem praktischen Interesse ist. Sie erstreckt sich nicht allein auf die einfache Uebertragung der Energie zwischen zwei entfernten Punkten, wie man es gewöhnlich auffasst, sondern man kann mehr oder weniger jede technische Verwendung, welche die Elektrizität findet, als elektrische Kraftübertragung bezeichnen.

Kapitel I.

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

Eine gründliche Kenntniss des Principis der Erhaltung der Kraft, welches die ganze Natur beherrscht, muss nothwendigerweise die Grundlage bilden 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 der ursprüngliche Betrag der Energie ungeändert bleibt, während die Form, in welcher sie auftritt, manche Aenderungen erfährt. Wenn z. B. eine Lokomotive einen Eisenbahnzug zieht, so sind wir nicht verlegen über die Erklärung, 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. Dieser entsteht durch Deformation, Reibung, Abnutzung und Erhitzung derjenigen Körper, 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 anderen Form verständlich geworden. Mit der elektrischen Energie und der chemischen Wirkung verhält es sich anders. Wir können uns keine Vorstellung von dem Process machen, welcher in einem galvanischen Element stattfindet, wo die Energie der chemischen Wirkung in die eines elektrischen Stromes verwandelt wird. Wir

können uns ferner kein Bild davon machen, wie dieser Strom, nachdem er Hunderte von Meilen in einem Draht zurückgelegt hat, fähig ist, mechanische Energie dem Anker eines Elektromagneten mitzutheilen und hierdurch telegraphische Signale hervorzubringen. 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 Energie, 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 Gesamtbetrag an elektrischer Energie aus einem bestimmten Gewicht der Metalle erhalten werden kann.

In ähnlicher Weise giebt es ein bestimmtes und konstantes Verhältniss zwischen elektrischer und mechanischer Energie. Dasselbe wird nur etwas complicirt durch die Entstehung von Wärme, welche immer mit den elektrischen Erscheinungen verbunden ist. Aber wenn wir für die als Wärme verloren gegangene Energie den entsprechenden Betrag in Abzug bringen, so finden wir, dass ein gegebener Aufwand an elektrischer Energie stets denselben Betrag von mechanischer Energie hervorbringt, welche specielle Art der Verwandlung wir auch wählen. Obleich 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 Verständniss dieser Beziehungen erleichtert. Ein solches geistiges Bild ist die Theorie der magnetischen Kraftlinien, welche zuerst von Faraday aufgestellt 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. Da alle Experimente, welche wir anstellen können, mit dieser Auffassung verträglich sind und sie uns in den Stand setzt, nicht allein experimentelle Thatsachen zu erklären, sondern sie auch wirklich zu messen und zu berechnen, so ist es zweckmässig, die Theorie der magnetischen Kraftlinien den elektro-mechanischen Untersuchungen zu Grunde zu legen.

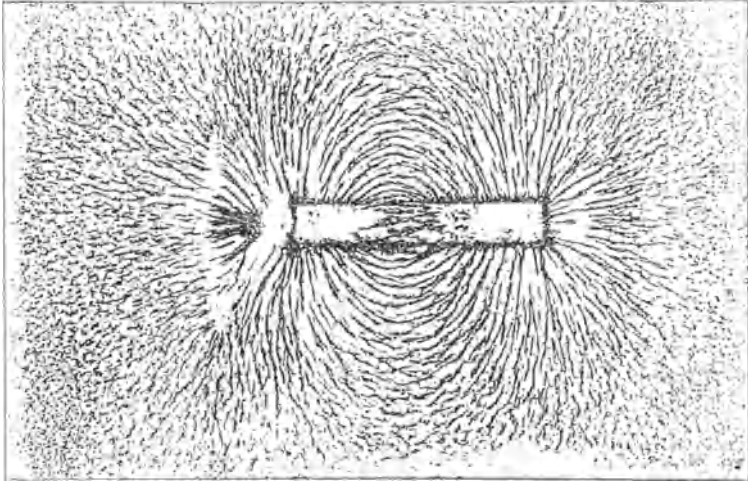


Fig. 1.

Legen wir ein Blatt Papier über einen geraden Stahlmagneten, 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 ansehen¹⁾, Fig. 1. Jede

¹⁾ Sehr zweckmässig kann man diese Kurven mittelst einer Glasplatte fixiren, deren Oberfläche mit einer dünnen Schicht von Paraffin bedeckt ist. Die Glasplatte wird über den Magneten 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 fest. Die Glasplatte kann dann wie jede andere Zeichnung behandelt

dieser Linien bildet eine geschlossene Kurve, die von einem Punkte des einen Magnetendes ausgeht und zu dem entsprechenden Punkte des anderen 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 Magneten zwei mathematische Punkte wären, so würden alle Linien durch diese Punkte hindurchgehen, aber da wir es mit einem physikalischen Magneten 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, wenden wir eine lange dünne Nadel an (z. B. eine magnetisirte 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 das untere Ende der Nadel von dem einen Pol des Magneten abgestossen, von dem anderen angezogen wird, und 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 ein freier Magnetpol unter dem Einfluss des Magneten sich bewegt. Ein freier Magnetpol vom entgegengesetzten Zeichen wird längs denselben Kraftlinien, aber in entgegengesetzter Richtung verlaufen, und hat er dieselbe Stärke, so wird er mit gleicher Kraft fortgetrieben. Wenn wir statt einer langen vertikalen Nadel eine sehr kurze nehmen, die horizontal in ihrem Mittelpunkt 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 irgend einer der Kurven wir die Nadel auch immer bringen, sie wird eine solche Lage annehmen, dass ihre magnetische Achse, d. h.

werden, und das Bild der Kurven lässt sich durch Photographie vervielfältigen.

die gerade Verbindungslinie ihrer beiden Pole, eine Tangente der Kurve wird (Fig. 2). Man muss hierbei beachten, dass, wenn eine im Vergleich zu dem Magneten nicht sehr kurze Nadel in die Nähe eines Pols gebracht wird, sie sich aufrecht stellt, weil in diesem Falle ein merkbarer Unterschied in den Entfernungen ihrer beiden Pole von dem Pole des liegenden Magneten vorhanden ist und weil in Folge dessen die entgegengesetzt gerichteten Kräfte nicht mehr im Gleichgewicht sind. Aber wenn die Nadel sehr kurz ist, nicht länger wie ein Theilchen von den Eisenfeilspähnen, so ist auch bei einer kleinen Entfernung von dem Pole des Magneten 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 längst derselben. Wir können auf diese Weise jedes Eisentheilchen, welches

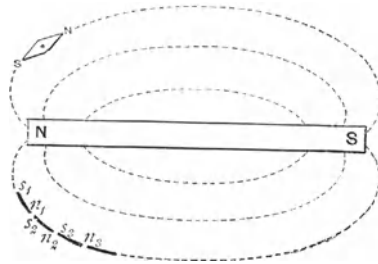


Fig. 2.

auf dem Papier liegt, als eine sehr kurze Magnetenadel betrachten und jede Kraftlinie als eine Kette solcher Nadeln, deren Glieder mit ihren entgegengesetzten Polen — n_1s_2 , — n_2s_3 , — n_3s_4 — u. s. w. zusammenhängen, wie Fig. 2 zeigt. Denken wir uns nun, dass die Theilchen einer solchen Kette, während sie noch unter der Einwirkung des Magneten sich 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 anderen, 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 wegen der Nähe der beiden entgegengesetzten Pole jedes Theilchen deren Entfernungen von einem äusseren Punkte, auf den eine Wirkung ausgeübt werden soll, fast vollständig gleich, und folglich die beiden entgegengesetzten Kräfte im Gleichgewicht wären. Indem wir jedes Theilchen 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 Magnetismus der ganzen Kette geschwächt,

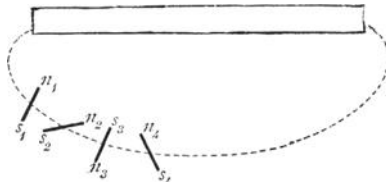


Fig. 3.

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 mit der Hand ausgeführt würde, so können wir es augenblicklich dadurch vollziehen, dass wir unseren 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 tangentielle 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 Magnetismus¹⁾, wie sie von

¹⁾ Proceedings of the Royal Society, May 10., 1883; siehe auch eine Abhandlung über „die Ursache des Magnetismus in Eisen, Stahl und anderen Metallen“ der Society of Telegraph Engineers and Electricians mitgeteilt und in deren Journal, vol. XII, Nr. 49 abgedruckt.

Weber, Wiedemann, Hughes und anderen 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 anderen 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, und deshalb üben sie keine magnetische Fernwirkung aus, wie es bei unserer Kette von Eisenfeilspähnen der Fall war, nachdem wir die letzteren gedreht hatten. Aber wenn es durch irgend ein Mittel möglich ist, alle Moleküle so zu drehen, dass sie nach einer Richtung zeigen, ohne sie indessen 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 werden. Wir werden 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 grösser ist der Grad der erhaltenen Magnetisirung. Da wir nicht jedes Molekül anfassen und mechanisch drehen können, so müssen wir eine andere Methode anwenden. Wir schicken Kraftlinien durch den Stab, um diese Arbeit auszuführen, wie wir es bei der Kette der Eisenfeilspähne machten. Dieses geschieht entweder mit Hilfe eines anderen Magneten 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. Andererseits werden die einmal in die Lage der magnetischen Continuität gedrehten Moleküle nicht leicht wieder gestört und je härter der Stahl ist, um so permanenter ist 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 welche magnetisirt werden kann, indem man sie mit einem Magnetpol streicht. Wir sehen alsdann, dass die Eisentheilchen, welche anfangs in allen möglichen Richtungen lagen, mehr oder weniger sich parallel zu der Längsrichtung der Röhre lagern, und das Ganze bekommt das Ansehen eines festen Eisenstückes von stark sehninger Beschaffenheit. Die Röhre ist nun ein Magnet geworden, und wenn sie sorgfältig behandelt und die Anordnung der Theilchen nicht gestört wird, so kann man sie wie einen festen Stahlmagneten verwenden und alle gewöhnlichen Erscheinungen der Anziehung und Abstossung in die Ferne erhalten. Aber wenn man die Röhre schüttelt oder stösst, so gleiten die Theilchen in ihre anfängliche unregelmässige Lage zurück, und es verschwinden alle Spuren von freiem Magnetismus. Aus diesem kurzen Abriss der Weberschen Theorie sieht man, dass das einzige Mittel, wodurch wir auf die Moleküle im Innern eines Eisen- oder Stahlstabes wirken können, darin besteht, Kraftlinien hindurchzuschicken. Je grösser die Zahl der Kraftlinien ist, um so kräftiger sind die Linien, längs denen sich die Moleküle des Stabes anordnen — oder mit anderen 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. Es ist auch klar, dass, nachdem ein Stab magnetisirt worden ist, der benachbarte Raum mit Kraftlinien angefüllt wird, die von dem Stabe ausgehen. 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 Magneten unmittelbar umgiebt. Diesen nennt man „magnetisches Feld“. Da die magnetischen Linien in Wirklichkeit nicht existiren, sondern nur eine zweckmässige Vorstellung bilden, so können wir auf einfache Art ihre Grösse, oder genauer die Stärke des magnetischen Feldes in einem gegebenen Punkte ausdrücken. Wir können entweder annehmen, dass die Kraftlinien von verschiedener Stärke sind und dass die mechanische Kraft, mit welcher ein gegebener freier Magnetpol längs irgend einer Kraftlinie bewegt wird, von der Stärke dieser Kraftlinie abhängig ist, welche von derjenigen einer anderen, zu demselben Felde gehörenden Kraftlinie verschieden sein kann; oder wir können festsetzen, dass alle Kraftlinien von derselben Stärke sind, aber dass die Zahl derselben, welche durch die Einheit des Raumes im Felde verläuft, an verschiedenen Punkten verschieden ist. Nach dieser 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 durch die Einheit des Raumes an dem betreffenden Punkte hindurchgeht. 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. Wenn wir dies trotzdem versuchen, so sehen wir bald, dass die Vorstellung von den Kraftlinien keinen Anspruch auf Realität machen kann. Es geht dies aus folgender Betrachtung hervor. Setzen wir voraus, dass eine mechanische Kraft nur durch Kraftlinien ausgeübt wird, die wirklich durch den Magnetpol hindurchgehen, so ist es klar, dass, wenn der magnetische Pol ein mathematischer Punkt ist, nur eine Linie hindurchgehen und eine mechanische Kraft ausüben kann. Diese Kraft würde deshalb von der Dichte der Linien rund um Pol herum ganz unabhängig sein. Wenn aber der Pol, obgleich von derselben Stärke, endliche Dimensionen hat, so gehen mehr Linien in Wirklichkeit durch ihn hindurch, und es würde eine grössere mechanische Kraft ausgeübt. Das Experiment zeigt indessen, dass dies nicht der Fall ist und dass innerhalb vernünftiger Grenzen die mechanische Kraft von der Ausdehnung des Pols unabhängig ist und nur von dessen freiem Magnetismus abhängt. Hieraus schliessen wir, dass eine genau geometrische Darstellung der Dichte der Linien in einem magnetischen Felde, in derselben Weise, wie wir uns die Dichte von Bäumen in

einem Walde vorstellen, falsch sein würde. Wir können das Problem einer geometrischen Darstellung für unsere Auffassung der magnetischen Feldstärke nicht lösen und müssen uns begnügen, die Darstellung in dem festgesetzten Sinne zu gebrauchen, ohne eine klare Vorstellung davon zu haben, wie sie durch einen mechanischen Vorgang erklärt werden kann. 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 unseren 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 definieren müssen, welche auf einen freien Magnetpol von der Stärke 1 mit der Einheit der Kraft wirkt. Um den Magnetpol von der Stärke 1 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 bewiesen, der hierzu einen grossen festen Magneten und eine kleinere aufgehängte Magnetenadel angewandte. Es heisst folgendermassen: Wenn wir mit M und m die Stärke zweier Pole bezeichnen, welche die Entfernung r von einander haben, 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 Stärke Eins ein solcher ist, der in der Entfer-

nung Eins 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 Masssystems von 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 elektro-magnetische Masssystem. Wenn wir diese Einheiten unseren Berechnungen zu Grunde legen, so können wir alle anderen Masseinheiten daraus ableiten, weil sie alle auf irgend eine Art mit den Fundamenteinheiten der Masse, Länge und Zeit verknüpft sind. Wir finden auf diese Weise, dass die Einheit der Geschwindigkeit ein Centimeter in der Sekunde ist, die der Beschleunigung ein Geschwindigkeitszuwachs von einem Centimeter in der Sekunde, und 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 eine Geschwindigkeit (oder Beschleunigung seiner Geschwindigkeit) von einem Centimeter in der Sekunde hervorruft. Die mechanische Energie, welche durch die Kraft von einer Dyne hervorgerufen wird, wenn sie längs dem Wege von einem Centimeter wirkt, ist die Einheit der Energie und wird das Erg genannt. Nachdem wir diese fundamentalen und daraus abgeleiteten Einheiten angenommen haben, können wir dazu übergehen, die Einheiten für die Kraftlinien und für die Stärke des magnetischen Feldes aufzustellen. Wir sagen, die Kraftlinie hat die Stärke Eins, wenn ein auf sie gebrachter Einheitspol mit der Kraft einer Dyne sich längst derselben fortbewegt. Die Einheit des magnetischen Feldes würde eine solche sein, wo auf den Einheitspol die Kraft einer Dyne wirkt. Wenn wir durch den Versuch finden, dass eine gleiche Kraft in 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 gleichförmig magnetisches Feld von der Stärke Eins 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 Magneten hervorgerufen. Der Versuch lehrt, dass es physikalisch unmöglich ist, einen Magneten mit nur einem Pol zu erzeugen und dass deshalb ein freier Magnetpol in der Natur

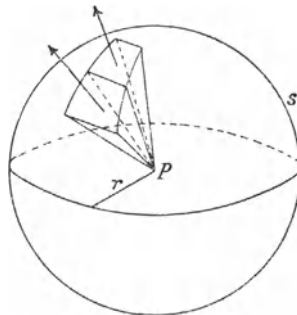


Fig. 4.

nicht existieren kann. Aber wir können einen freien Pol angenähert herstellen, wenn wir den Magnet im Vergleich zu der Stärke seiner Pole sehr lang machen. Alsdann macht sich der magnetische Einfluss von nur einem Pole innerhalb einer Entfernung bemerkbar, die kleiner als die Länge des Magneten ist, und wenn wir die magnetischen Eigenschaften des einen Pol unmittelbar umgebenden Raumes untersuchen, so können wir den störenden Einfluss des anderen Poles vernachlässigen. In diesem Falle sind die Kraftlinien, welche von dem betrachteten Pol ausgehen, gerade Linien, die sich von diesem 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, ist alsdann gleich $\frac{M}{r^2}$. Wenn man nun um den Polmittelpunkt 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 unseren Einheitspol auch bringen mögen, er wird stets mit derselben Kraft von P angezogen, und 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 Entfernung Eins die Einheit der Feldstärke hervor.

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 konzentrischen 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 Magneten parallel zum Draht aufhängen, so dass sein unteres Ende sich 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 Magneten 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 Eisenfeilspänen muss als eine in sich



Fig. 5.

geschlossene Kette kleiner Magnete betrachtet werden, und wenn wir einen Stahlring um den Draht legen würden, so würde dieser ein kontinuierlicher Magnet werden. Nach seiner Entfernung würde er keinen nach aussen wirkenden Magnetismus zeigen, da seine Moleküle alle mit entgegengesetzten Polen sich berühren, aber wenn wir den Zusammenhang unterbrechen, indem wir den Ring an einer Stelle aufschneiden und der Länge nach strecken, so zeigen die getrennten Enden verschiedene Polarität. Wenn wir statt eines vollständigen Ringes nur ein Segment eines solchen oder ein gerades Stahlstück rechtwinklig zu dem Draht hinlegen, so werden beide nach ihrer Entfernung magnetische Eigenschaften zeigen. Wir lernen aus diesen Versuchen, dass es möglich ist, ein Stahlstück zu magnetisieren, wenn man in seiner Nähe und rechtwinklig zu ihm einen elektrischen Strom vorbeigehen lässt. Alle diese Versuche gelingen ebenso gut bei einem gebogenen Draht, und wenn

wir eine Drahtrolle anwenden, in die wir rechtwinklig zur Ebene der Rolle ein Stahlstück bringen, so wird dessen Magnetismus bedeutender werden, als wenn wir nur einen einzigen geraden Draht anwenden. Die Skizze in Fig. 6 giebt eine deutliche Vorstellung von den Kraftlinien, die eine kreisförmige, vom Strom durchflossene Rolle umgeben. Die Zink- und Kupferplatte eines galvanischen Elements sind durch einen kräftigen, kreisförmigen Draht verbunden, und da alle Kraftlinien um den Draht in gleichem 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

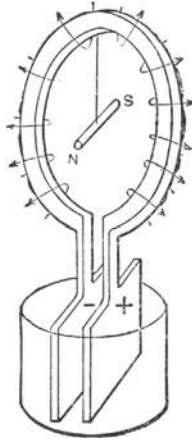


Fig. 6.

anderen 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 Ampère'sche Regel bestimmt: Man denke sich eine Person, welche mit dem Strom schwimmend nach der Nadel sieht; alsdann wird der Nordpol nach der linken Seite derselben abgelenkt. 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. Es ist klar, dass,

wenn wir den Nordpol des Magneten dem Kreise von vorn nähern, also von der Seite, welche dem Beschauer der Figur zugewendet ist, derselbe abgestossen wird, nähern wir dagegen den Südpol, so wird dieser angezogen. Das Umgekehrte findet auf der Rückseite statt. Dasselbe würde eintreten, wenn wir statt des vom Strom durchflossenen Drahtkreises einen sehr kurzen Magneten 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, können wir einen Magneten erhalten, welcher in seiner Fernwirkung sich gerade so verhält wie der Kreisstrom. Ein solcher Magnet wird eine äquivalente magnetische Schale genannt. Die

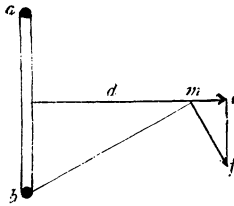


Fig. 7.

Wirkung, welche ein physikalischer Magnet oder eine magnetische Schale, 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 gleich Eins sind, 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, und wir können die Einheit des Stromes als den Strom definiren, welcher in einem ebenen Stromkreis fließend, einer magnetischen Schale äquivalent ist, deren Moment numerisch gleich der Fläche des Stromkreises ist. Es sei in Fig. 7 ab der Querschnitt durch einen kreisförmigen Leiter vom Radius r , welcher vom Strom i durchflossen ist und m ein Magnetpol, der um d vom Mittelpunkt des Drahtkreises entfernt ist. Alsdann

ergiebt das Experiment, dass jedes Leiterelement auf den Magnetpol eine Kraft ausübt, die numerisch gleich dem Produkt von 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 herührt, sei mf , ihre Grösse ist mithin

$$dF = \frac{im dl}{d^2 + r^2}.$$

Die horizontale Komponente dieser Kraft ist offenbar

$$dH = dF \frac{r}{\sqrt{d^2 + r^2}} = \frac{im r dl}{(d^2 + r^2)^{3/2}}$$

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

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

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

$$H = \frac{2\pi im}{r}$$

Diese Gleichung enthält noch eine andere Definition für die Einheit des Stroms. Man sieht, dass, wenn m , r und i gleich der Einheit werden, H gleich 2π wird, und wir können die Einheit des Stroms als den Strom definiren, welcher, in einem Kreise vom Radius gleich Eins fliessend, auf den in seinem Mittelpunkt befindlichen Einheitspol eine Kraft von 2π Dynen ausübt.

Wenn ein Magnet in eine Drahtrolle gebracht 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 Magneten in eine Rolle hineinbringen oder ihn herausziehen, wir eine elektromotorische

Kraft in der einen oder anderen Richtung in dem Drahte selbst hervorrufen. Um die Erscheinung zu erklären, gehen wir auf den Begriff der Kraftlinien zurück. Es ist offenbar, dass wenn wir den Magneten der Drahtrolle nähern, wir nicht allein das Metall bewegen, sondern auch alle Kraftlinien, welche es umgeben, und 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 wir die Drahtspule gegen ihn bewegen; der Draht schneidet auch dann Kraftlinien, und es wird folglich eine elektromotorische Kraft hervorgerufen. Wir können nicht das Wie und Warum dieser Wirkung erklären und müssen uns damit begnügen, sie ausreichend durch den Versuch constatiren zu können. Eine genaue Untersuchung zeigt ferner, dass die Stromstärke und folglich auch die Grösse der elektromotorischen Kraft der Geschwindigkeit der Bewegung und der Stärke des Magneten 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 ferner der Anzahl der Drahtwindungen auf der Spule proportional.

Bringen wir den Magneten in die Spule, so beobachten wir einen Widerstand, der einen Aufwand von mechanischer Energie erforderlich macht, deren Grösse dem Produkt von 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 Magneten entgegen wirkt.

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 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 ein Unterschied des Potentials an seinen Enden, welcher bewirkt, dass Elektrizität von der Stelle höheren Potentials zu

derjenigen geringeren Potentials fliesst. Ein solcher Strom kann wirklich beobachtet werden, wenn die Stäbe mit einem Galvanometer verbunden sind. Es sei d die Entfernung der Stäbe, v die Geschwindigkeit des Schlittens und F die Feldstärke. Alsdann ist Fdv der Unterschied des Potentials 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

$$i = \frac{F d v}{w}.$$

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. Wir sagen deshalb, dass der Widerstand eines Leiters so und so viele Centimeter in der Sekunde beträgt. Man giebt gewöhnlich die Grösse der Widerstände bezogen auf ein Normalmass, das Ohm, an. Die Beziehung zwischen diesem und der Einheit des Widerstandes in absolutem Mass wollen wir sogleich erklären. Doch 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 Erg ausgedrückte Energie ist alsdann 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 Fdv entsteht. Wir haben bis jetzt den Ausdruck Potential gebraucht, ohne ihn zu definiren. Wie der Name sagt, ist das Potential eines Körpers seine Fähigkeit, potentielle Energie zu sammeln, 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 wieder fallen und dabei den Widerstand irgend einer Maschine überwinden lässt, welche nützliche 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. Indem wir das so definirte Potential mit dem Gewicht des Körpers multipliciren, erhalten wir die gesammte mechanische Energie, welche er ausüben kann.

Aehnliche Schlussfolgerungen kann man bei der Elektrizität anstellen. Es ist hinreichend bekannt, dass zwei Körper, die mit gleichnamiger Elektrizität geladen sind, einander abstossen, und wenn einer der beiden Körper fest ist, muss bei Annäherung des anderen mechanische Energie für die Bewegung des letzteren aufgewandt werden. Diese Energie kann man wieder gewinnen (vorausgesetzt, dass durch Zerstreung der Elektrizität in die umgebende Luft kein Verlust entsteht), sobald der bewegliche Körper sich von dem ruhenden Körper zurückbewegt und dabei nützliche Arbeit leistet. Um die Sache besser zu erläutern, nehmen wir an, dass der ruhende Körper eine sehr grosse metallische Kugel bildet, die mit einer gewissen Menge positiver Elektrizität geladen ist, und der bewegliche Körper dagegen ein kleines vergoldetes Hollundermarkkugelchen, das mit der Einheit der positiven Elektrizität geladen ist. Wir setzen die beiden Körper deshalb an Grösse sehr verschieden voraus, damit die Ladung des grösseren Körpers nicht merkbar durch die Aende-

zung der Lage des kleinen Körpers beeinflusst wird. Wenn wir das Hollundermarkkugelchen unendlich weit entfernen, so dass es sich vollständig ausserhalb des Wirkungskreises des grösseren Körpers befindet, so ist seine Lage analog der des Einheitsgewichts auf dem gegebenen Niveau. Nähern wir nun das Hollundermarkkugelchen der grossen Kugel, so müssen wir mechanische Arbeit leisten, und nach Sir William Thomsons Definition wird das elektrische Potential der Kugel durch die Grösse der aufgewendeten mechanischen Arbeit gemessen. Wenn wir statt aus unendlicher Entfernung von einer anderen Kugel ausgehen, die ein von der ersten verschiedenes Potential hat, so würde die für die Uebertragung des Hollundermarkkugelchens aufgewandte Arbeit ein Mass für den Unterschied des Potentials der beiden Kugeln sein. Es leuchtet von selbst ein, dass, wenn wir statt eines Kugelchens zwei, drei oder mehr fortbewegen, oder wenn die Ladung desselben statt einer Einheit der Elektrizität zwei, drei und mehr Einheiten beträgt, die mechanische Energie in demselben Verhältniss wächst. Hieraus folgt, dass die mechanische Arbeit, welche erforderlich ist, um q Elektrizitätseinheiten 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 Elektrizität nicht mittelst unseres Hollundermarkkugelchens stattfindet, das mit einer gewissen elektrischen Ladung q versehen ist, sondern mittelst eines Drahtes, in dem ein kontinuierlicher Strom fliesst. Denn dieser kann als eine Reihe von Hollundermarkkugelchen angesehen werden. Bei unserem Versuche mit dem Schlitten ist i die Stromstärke oder die in einer Sekunde übertragene Elektrizitätsmenge, 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

$$P = i F l.$$

Die mechanische Kraft, für die Bewegung eines geraden Leiters durch den ein Strom i fliesst, in einem gleichförmigen Felde von der Stärke F , rechtwinklig zur Richtung Kraftlinien, ist gleich dem Produkt aus der Länge des Leiters, der Stromstärke und der Feldstärke.

Diese Beziehung ist von grösster Wichtigkeit für die Konstruktion der Elektromotoren, da die so bestimmten mechanischen Kräfte die Leistungen dieser Maschinen angeben. Es ist deshalb wünschenswerth, den oben erhaltenen Ausdruck noch auf einem anderen Wege zu beweisen, und dies kann leicht geschehen, wenn wir auf den Ausdruck für die Kraft zurückgehen, die ein vom Strom durch flossener 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 Verhältniss zu seinem Abstand von dem Pole sehr klein 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 . Indem wir für $\frac{m}{R^2}$ die Grösse F setzen, bekommen wir

$$P = i F l,$$

also denselben Ausdruck, den wir oben erhalten hatten.

Wir kehren nun zu unserem früheren 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 längst 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. Wir haben damit den einfachsten Fall, wie man elektrische Energie in mechanische umsetzen kann. Sobald der Schlitten sich bewegt, schneidet er Kraftlinien, und hierdurch wird ein Unterschied des Potentials an seinen Enden hervorgerufen, oder wie wir es auch ausdrücken können: der Schlitten wird

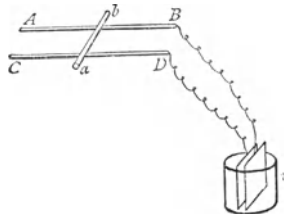


Fig. 8.

der Sitz einer elektromotorischen Kraft. Eine kurze Ueberlegung zeigt, dass diese elektromotorische Kraft die entgegengesetzte Richtung, wie diejenige des Elements, haben muss. 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 es in einem Schliessungskreise zwei elektromotorische Kräfte giebt, 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 be-

deutet. Den resultirenden Strom findet man folglich dadurch, dass man $E - e$ durch den Gesamtwiderstand des Schliessungskreises dividirt. Wenn der Schlitten sich längst den Stäben bewegt, 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 komplizieren, nehmen wir an, dass die Stäbe so dick sind, dass sie keinen nennenswerthen Widerstand haben. In diesem Fall wird der gesammte Widerstand nur aus der Summe der Einzelwiderstände von Schlitten, Verbindungsdrähten und Element bestehen. Er sei gleich w , wie vorhin. Nach dem Ohmschen Gesetz ist der Strom 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

$$\begin{aligned} A &= i F l v, \\ A &= \frac{E - e}{w} F l v, \end{aligned}$$

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 beschrieben wird. Wenn wir $F l v = z$ setzen, so haben wir für die mechanische Energie, welche das Gewicht haben 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 $e = Flv$ und $P = iFl$ ist, so erhält man

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

woraus hervorgeht, dass bei konstanter Geschwindigkeit und konstantem Strome das Gewicht, welches der Schlitten heben kann und folglich überhaupt seine Fähigkeit, Arbeit zu leisten, der elektromotorischen Gegenkraft direkt proportional ist. Man sieht ferner, wie falsch es ist, die elektromotorische Gegenkraft als einen Verlust anzusehen, und dass die Erfinder, welche Motoren mit möglichst kleiner elektromotorischer Gegenkraft bauen wollen, damit der Strom, der den Motor treibt, nicht schwankt, günstigen Falls Maschinen erhalten würden, die überhaupt keine Kraft liefern.

Die Energie, welche das Element erzeugt, ist gleich Ei , die vom Schlitten geleistete ist 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 nach A und setzen diesen gleich Null. Als Variable betrachten wir hierbei die elektromotorische Gegenkraft e . Dies giebt

$$\begin{aligned} 0 &= \frac{dA}{de} = E - e + e \frac{d(E - e)}{de}, \\ 0 &= E - 2e, \\ e &= \frac{E}{2}. \end{aligned}$$

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 Gewicht P an der Schnur so reguliren, dass

$$v = \frac{E}{2Fl}; \quad P = \frac{E}{2w} \quad \text{und} \quad i = \frac{EF l}{2w}.$$

Wird ein schwereres Gewicht an die Schnur gehängt, so wird der Strom grösser und die Geschwindigkeit kleiner; wählt man ein leichteres Gewicht, so wird der Strom kleiner und die Geschwindigkeit grösser. Nach beiden Richtungen giebt es eine Grenze, welche auf der einen Seite erreicht wird, wenn das Gewicht Null und die Geschwindigkeit damit ein Maximum wird, auf der anderen Seite steht der Schlitten still, wenn das Gewicht schwer genug ist und der Strom sein Maximum erreicht hat. Diese Grenzwerte 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

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

Wenn wir diese Ausdrücke mit denen vergleichen, welche für die Bedingung der maximalen Arbeit gelten, so ergibt sich, dass in letzterem Fall der Strom 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 continuirliche 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 den letzteren gefunden haben, sind auch für die Maschine anwendbar. 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 hindurchgehende 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 muss nämlich darauf achten, dass ein so starker Strom nie länger als einige Sekunden durch den Anker gehen darf; und wenn 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 wir in der Regel nicht mit dem niedrigen Wirkungsgrad von 50 % zufrieden sind. Aus der für den Wirkungsgrad oben angegebenen Formel geht hervor, dass, je mehr sich die elektromotorische Gegenkraft der elektromotorischen Kraft der Elektrizitätsquelle (in unserem Beispiel des galvanischen Elements) nähert, um so mehr der Wirkungsgrad der Einheit gleich kommt. 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 sein, welchen wir den Strom zuführen, und A'B' und C'D' diejenigen, in welchen ein Strom durch die Bewegung des Schlittens a' b' erzeugt wird. Es ist klar, dass, wenn wir dem letzten Schlitten mechanische Arbeit zuführen, wir bewirken können, 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, welche der Motorschlitten abgibt; es seien ferner v und v_1 die be-



Fig. 9.

züglichen Geschwindigkeiten und e_1 und e 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 diejenige, welche der Motorschlitten abgibt, in einem bestimmten Verhältniss zu einander stehen. Diese

ist von der Geschwindigkeit unabhängig, hängt aber von den Feldstärken und den Dimensionen l_1 und l der Schlitten ab. Die Energie, welche an das Generatorsystem 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 zurückliefert, ist

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

Das Verhältniss 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 anwendet, die eine als Generator, die andere als Motor, und beides Hauptstrommaschinen sind, so dass derselbe Strom um beide Systeme von Feldmagneten fliesst. In solchen Fällen war es Gebrauch, den elektrischen Wirkungsgrad der Kraftübertragung dadurch zu bestimmen, dass man einfach das Verhältniss 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 Art, den Wirkungsgrad zu bestimmen, erheben. Aber in der Praxis kann man manches gegen diese Methode einwenden. Erstens sind die beiden magnetischen Felder nicht gleich stark, obgleich sie von derselben magnetisirenden Kraft hervorgebracht werden. Denn der Magnetismus des Ankers, der durch den seine Windungen durchfliessenden 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 elek-

tromotorische Gegenkraft des Motors hervor. Denn da $e = Flv$ ist, so hat eine Abnahme von F , wie sie in Folge von Isolationsfehlern in der Leitung und von dem damit verbundenem Stromverlust eintritt, natürlich die Wirkung, die Geschwindigkeit des Motors v zu vergrössern. Auf diese Weise kann das Verhältniss 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 , l_1 und die Feldstärken konstant sind.

Da das Verhältniss 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 hinaufzuzieht, 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 Energie 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 Verhältniss zu. Da das Verhältniss 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 andererseits die Geschwindigkeit des Generators unter eine gewisse Grenze abnehmen lassen, so wird der Motor sich überhaupt nicht bewegen.

Dies geschieht, wenn

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

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

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

Die mechanische Energie, welche für den Generator aufgewendet wird, ist

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

und die, welche der Motor abgiebt,

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

Die Differenz beider geht verloren. Als diesen Verlust, welcher gleich $w \left(\frac{P}{F l} \right)^2$ ist, muss man die Energie betrachten, 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 von Strom, Feldstärke und Dimension der Maschine ist. Der Quotient $\frac{P}{F l}$ ist daher nichts anderes als der Strom, 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 i im Schliessungskreis vom Widerstand w entwickelt.

Auf diese Weise ist die gesammte dem Generator zugeführte Energie berechnet: theils wird sie vom Motor abgegeben, theils als Wärme im Stromkreis verbraucht. Es braucht kaum erwähnt zu werden, dass die für die Kraftübertragung abgeleiteten Formeln sich auf ideale Maschinen beziehen, welche von allen anderen mechanischen und elektrischen Verlusten frei sind, aber dass man für die wirkliche Praxis diese anderen Verluste nicht vernachlässigen kann und dass sie noch bedeutend die Lösung des Problems erschweren. Der Verfasser hat es trotzdem für rathsam erachtet, die Kraftübertragung an den idealen Maschinen zu erklären, nicht weil 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 späteren Kapitel folgen werden.

Das angeführte Beispiel haben wir auch deshalb gewählt, um zu zeigen, wie leicht und einfach das absolute elektromagnetische Masssystem 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 wiederum sind andere so gross, dass man mit Brüchen rechnen muss. Wir haben schon gelegentlich die drei am häufigsten vorkommenden Einheiten erwähnt, nämlich diejenigen der Stromstärke, der elektromotorischen Kraft und des Widerstandes. Die Einheit der Elektrizitätsmenge 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, ihre Kapazität, womit wir ihre Eigenschaft, eine elektrische Ladung aufzunehmen, bezeichnen. Die Kapazität wird durch die Elektrizitätsmenge gemessen, mit welcher ein Körper durch die Einheit der elektromotorischen Kraft geladen wird. Die Beziehung zwischen den sogenannten technischen Einheiten und den ihnen im C. G. S.-System entsprechende, ist folgende:

Name der elektrischen Grösse.	Technische Einheit.	Entsprechende C. G. S.-Einheit.
Stromstärke	Ampère	10^{-1}
Elektromotorische Kraft . .	Volt	10^8
Widerstand	Ohm	10^9
Elektrizitätsmenge	Coulomb	10^{-1}
Kapazität	{ Farad	10^{-9}
		{ Microfarad
Arbeit	Watt	10^7

Kapitel II.

Der erste Elektromotor. — Die Forbes'sche Dynamomaschine. — Die ideale Wechselstrommaschine. — Die ideale Gleichstrommaschine. — Der Siemens'sche Π -Anker. — Selbstinduktion. — Versuche mit Elektromotoren. — Der Hefner-Altenecksche Trommelanker. — Der Grammesche Ringanker. — Der Pacinottische 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 unter gegebener Potentialdifferenz entstehender 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 verdunkeln. Es ist nun nothwendig, den Gegenstand von einem mehr technischen Standpunkt zu betrachten und zu zeigen, wie die Verwandlung von mechanischer und elektrischer Energie mit einer Maschine von praktischer Form geschehen kann. Als ersten Schritt für die wirkliche Lösung der Aufgabe, Bewegung durch einen elektrischen Strom hervorzubringen, müssen wir das Barlow'sche Rad¹⁾ betrachten, das vor ungefähr siebenzig Jahren von Sturgeon und Barlow erfunden wurde. Ein sternförmiges Rad 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, Fig. 10. Ein permanenter Stahlmagnet NS befindet sich in einer solchen Lage, dass die Kraftlinien, welche seine Pole verbinden, quer durch die Ebene des Kupferrades gehen. Wird in

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

der Pfeilrichtung ein Strom durch das Rad geschickt, so dreht sich dieses, von der Seite des Nordpols betrachtet, im entgegengesetzten Sinne des Uhrzeigers. Man sieht auf den ersten Blick, dass dieser Apparat sich von unserer Schlitteneinrichtung nur dadurch unterscheidet, dass bei ihm die Bewegung eine rotirende ist, und die magnetischen Kraftlinien horizontal 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 auch, dass das Experiment gelingt, wenn statt eines sternförmigen Rades eine volle Metallscheibe verwendet wird, bei welcher der tiefste Punkt des Umfanges in das Quecksilber taucht. Im Jahre 1831 kehrte Faraday den Versuch um und erhielt einen elektrischen Strom von einer Scheibe, die zwischen den Polen eines Magneten rotirte, Fig. 11. Der Magnet war so aufgestellt, dass

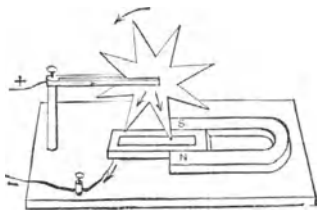


Fig. 10.

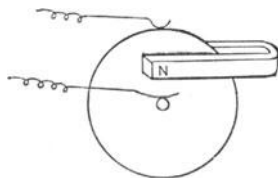


Fig. 11.

seine Kraftlinien durch die Scheibe gingen, und der Strom wurde durch Kontaktfedern an der Achse und der Stelle des Radumfanges abgenommen, wo die stärkste Induktion stattfindet. Kürzlich hat G. Forbes Dynamomaschinen nach demselben Princip konstruirt: der einzige Unterschied ist nur der, dass er statt des Stahlmagneten einen Elektromagneten verwendet, welcher durch den erzeugten Strom erregt wird.

Die Forbes'sche Maschine¹⁾ 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. 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 ge-

¹⁾ Siehe *The Engineer*, 17. Juli 1885.

schlossener Eisenkasten, welcher den Anker von allen Seiten umschliesst und zwei kreisförmige Höhlen von konischem 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 Spirale verlaufen und theils die eiserne Schale CD, welche den Feldmagneten 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 elektromo-

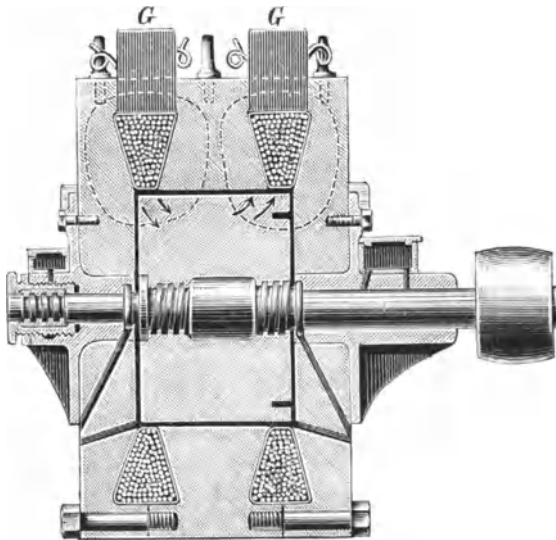


Fig. 12.

torischen 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 inneren 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, und kein Theil desselben bleibt unbenutzt. Dies ist einer der Gründe, warum die Maschinen im Verhältnis zu ihrer Grösse so

kräftig wirken. Der andere Grund ist der, 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 Magneten und dem Kern des Ankers ist. Bei Motoren oder Dynamomaschinen, wo Kupferdraht über den Ankerkern gewickelt ist, ist dieser Zwischenraum nothwendigerweise grösser als bei der Forbes'schen Dynamomaschine, wo der Raum zwischen Anker und Magnet 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 Ampère bei einer Spannung von 2 Volt. Nach den Angaben des Erfinders würde ein Anker von 1,22 m und 1,22 m Länge bei einer Geschwindigkeit von 1000 Umdrehungen in der Minute 60 Volt geben. Wenn wir annehmen, dass der Strom in demselben Verhältnis wächst, wie die Oberfläche des cylinderförmigen Ankers, so könnte diese Maschine 320 000 Ampère erzeugen, und es würden ungefähr 30 000 P. S. nöthig sein, um sie zu treiben. Dieser starke Strom würde jedoch eine grössere 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 „non-polare“ 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 Leiters, welche das Feld schneidet,

durch die Grösse des Ankers begrenzt ist. Diese Maschinen sind in Wirklichkeit nichts anderes als Dynamomaschinen, welche nur eine Drahtwindung auf ihrem Ankerkern haben. Eine ideale Maschine dieser Art ist in Fig. 13 abgebildet. Die Feldmagnete NS stehen einander horizontal gegenüber. Ihre Polflächen sind cylinderförmig ausgehöhlt, und zwischen ihnen kann eine einzige Drahtwindung mittelst einer Kurbel bewegt werden. Das eine Ende des Drahtes ist mit der Achse AA verbunden, das andere mit einer metallnen Hülse M, und an beiden schleifen Kontaktfedern, 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 verlaufen, werden zweimal bei jeder Umdrehung geschnitten. Die Wirkung ist dieselbe, als wenn wir eine Kurbel an unserem Schlitten befestigt hätten und durch

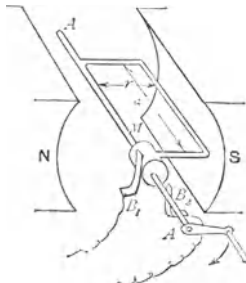


Fig. 13.

Drehung bewirkten, dass dieser eine entsprechende Bewegung zu den Kraftlinien annehme. In dem Falle, wo die Kurbel vertikal, also parallel zu den Kraftlinien steht, ist die Geschwindigkeit des Schlittens und deshalb auch seine elektromotorische Kraft ein Maximum. Wenn die Kurbel sich einem ihrer toten Punkte, also der horizontalen Lage nähert, nimmt die Geschwindigkeit und die elektromotorische Kraft des Schlittens ab und wird Null in dem Augenblick, wo die Bewegung umgekehrt wird. Aus dem, was wir in dem vorigen Kapitel gesagt haben, 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 Endstellung aus, und dieselben auf einer horizontalen Linie auftragen, die elektromotorischen Kräfte auf

einer vertikalen, 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 abhängt, aber nicht von seiner Lage in dem Felde, ist die elektromotorische Kraft offenbar dem Sinus des Kurbelwinkels proportional und wird durch die Gleichung

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

dargestellt, wo ω die Winkelgeschwindigkeit der Kurbel, α ihre Neigung, d die Länge des Leiters und F die Feldstärke bedeutet. Man sieht, dass $E=0$, für $\alpha=0$ und $\alpha=180^\circ$, während E für $\alpha=90^\circ$ oder $\alpha=-90^\circ$ seinen grössten numerischen Werth erreicht, der entweder positiv oder negativ je nach dem Vorzeichen von α ist. Dieselben Beziehungen gelten im Fall der idealen Wechselstrommaschine, Fig. 13. Nimmt die Kurbel die gezeichnete Stellung ein, so befindet sich der Draht in der Mitte des Südpols und schneidet die Kraftlinien mit der maximalen Geschwindigkeit; wenn die Kurbel vertikal steht, bewegt sich der Draht parallel zu den Kraftlinien und schneidet sie nicht. Die Stellung entspricht der Endstellung bei einem oscillirenden Schlitten. Wenn die Kurbel auf der linken Seite horizontal steht, ist der Draht in der Mitte des Nordpols, er schneidet wiederum das Maximum von Kraftlinien, die elektromotorische Kraft ist daher auch ein Maximum, aber der Strom hat jetzt die entgegengesetzte Richtung wie früher. 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 äusseren Kreis und tritt bei B_1 in die Maschine, 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 Winkelgeschwindigkeit des Drahtes, so ist, abgesehen vom Vorzeichen das Maximum der elektromotorischen Kraft:

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

Nun ist $2rd$ die ganze Fläche, welche vom Draht bestrichen wird, und $F2rd$ die gesammte Anzahl der Kraftlinien, welche durch diese

Fläche hindurch gehen; setzen wir dieselbe gleich z , so finden wir für das Maximum der elektromotorischen Kraft den Ausdruck:

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

Während einer halben Umdrehung wächst die elektromotorische Kraft von Null bis zu ihrem Maximum und nimmt alsdann wieder bis Null ab. Für die 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 welcher 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 Elektrizitätsmenge, welche durch den gesamten Kreis vom Widerstande W fließt, offenbar

$$\Delta q = \frac{F d \omega \sin \alpha \cdot \Delta t}{W},$$

und da $\omega = r \frac{\Delta \alpha}{\Delta t}$, so ist

$$\Delta q = \frac{F d r}{W} \sin \alpha \cdot \Delta \alpha.$$

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

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

Die Zeit, während welcher q Elektrizitätseinheiten entstehen, ist $t = \frac{\pi r}{\omega}$, und wenn während derselben Zeit eine konstante elektromotorische Kraft E_1 gewirkt hätte, so würde die erzeugte Elektrizitätsmenge gleich $\frac{E_1}{W} \frac{\pi r}{\omega}$ sein. Soll diese Grösse gleich q sein, so ist E_1 die mittlere elektromotorische Kraft, und ihr Werth ist durch die Gleichung

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

ausgedrückt. Da $F d \omega$ die maximale elektromotorische Kraft ist,

welche in dem Augenblick herrscht, wo der Draht die Kraftlinien rechtwinklig schneidet, so haben wir auch

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

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

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

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 anderen Seite ergänzen, aber die beiden Seiten von einander isoliren und das Ende der zweiten Hälfte an einer anderen Hülse aus Metall 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 äusseren Stromkreis haben — obgleich sie in Bezug auf einen festen Punkt im Raum entgegengesetzt gerichtet sind —, so liefert diese verbesserte Dynamomaschine mit zwei Drähten die doppelte elektromotorische Kraft, wie die ursprüngliche Anordnung. Wir könnten 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 Windungen, gezählt auf beiden Seiten der Achse, gleich Nt ist, so ist die mittlere elektromotorische Kraft

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

Wollen 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 äusseren 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 ab hervorgerufene elektromotorische Kraft nach dem Beschauer hingerichtet, und diejenige des Drahtes cd vom Beschauer weggerichtet. Die Enden dieser Drähte sind hinten durch das Querstück ac verbunden und vorn durch zwei Drähte df und bg mit den beiden Hälften eines Metallcylinders, welcher der Isolirung wegen auf einer hölzernen Nabe sitzt. Die in cd und ab entstehenden elektromotorischen Kräfte rufen einen Strom hervor, welcher in der Pfeilrichtung von der Bürste B_1 durch fd, ca und

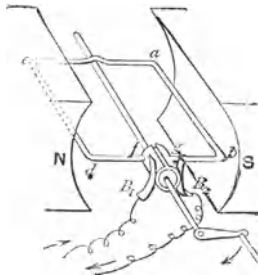


Fig. 14.

bg zu der Bürste B_2 verläuft und von da durch den äusseren Schliessungskreis nach B_1 zurückkehrt. Dies dauert so lange, bis die Kurbel die niedrigste 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 cd in die rechte Seite des Feldes und ab in die linke eintritt. In Folge dessen fliesst der Strom im äusseren 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 Funkenentwicklung statt. Um die Leistung der Maschine weiter zu vergrössern, kann man das einzige Drahtrechteck durch eine Spule mit vielen Windungen ersetzen, Fig. 16.

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, und könnten wir durch irgend

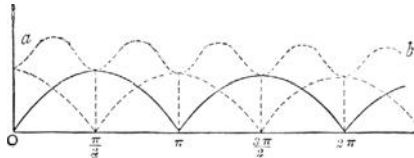


Fig. 15.

ein Mittel diesen Theil ihrer Bahn verkürzen, welcher vollständig in der Luft verläuft, so würden wir den Kraftlinien den Weg erleichtern und die Stärke des magnetischen Feldes vergrössern. Wir können annehmen, dass die Luft den Kraftlinien ungefähr einen 800 mal grösseren Widerstand entgegensetzt als Eisen. Füllen wir den Raum zwischen den Polflächen mit Eisen aus, so erreichen wir eine starke Zunahme der elektromotorischen Kraft und folglich auch der Stromstärke. Der Raum, welcher für diesen Zweck in Frage kommt, liegt innerhalb der Ankerspule; um die elektromotorische Kraft der Maschine zu vergrössern, müssen wir daher die Ankerspulen auf einen eisernen Kern wickeln. Eine der ersten Dynamomaschinen, welche nach diesem Princip konstruirt wurde, ist diejenige von Siemens, welche, im Jahre 1855 erfunden, mit dem sog. I-Induktor versehen ist. Der Kern besteht aus einem Eisen-cylinder und trägt zwei tiefe Längsfurchen, die so einander gegenüberliegen, dass der Querschnitt einem I gleicht. Der Draht wird

in diese Furchen gelegt, und seine 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. Es ist allgemein bekannt, dass ein fester Körper aus Metall heiss wird, 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 in entgegengesetzten Richtungen aufwärts auf der einen und abwärts auf der anderen Seite der Achse. 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

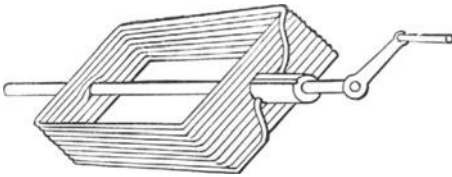


Fig. 16.

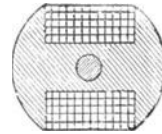


Fig. 17.

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 eine andere isolirende Masse getrennt sind. Die I-Anker werden jedoch nicht mehr viel für die heutigen Dynamomaschinen verwendet, da sie durch vollkommeneren Formen ersetzt sind, welche wir sogleich beschreiben werden. Bei kleinen Elektromotoren benutzt man sie jedoch heute noch.

Fig. 15 zeigt, dass die elektromotorische Gegenkraft dieser Motoren eine veränderliche Grösse ist, welche von der Winkelstellung des Ankers abhängt. Wenn die Köpfe des I-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 zu bewegen, und abgesehen von der Unbequemlichkeit, dass man den Motor gelegentlich mit der Hand antreiben muss, bieten die todten Punkte kein mechanisches Hindernis. Sie sind aber aus folgendem Grunde eine ernste Unvollkommenheit in elektrischer Beziehung: die Stärke des Stromes, welche 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 alsdann die erzeugte mechanische Energie Null ist. Wir nehmen hierbei an, dass der Motor durch einen Strom gespeist wird, der von einer konstanten elektromotorischen Kraft abhängt, wie es gewöhnlich in der Praxis der Fall ist. Wir haben nun zwei Fälle zu unterscheiden: der Motor kann eine Hauptstrom- oder eine Nebenschlusswicklung haben. Im ersteren 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 Feldmagneten, welche von dem Strome abhängt, gerade in dem Moment am kleinsten ist, wo der Anker die grösste Kraft ausüben muss, und dass auf der anderen 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 kurz geschlossen sind. Obgleich die Dauer dieses Kurzschlusses nur geringe Zeit währt, so ist sie

doch im Vergleich zu der Geschwindigkeit der elektrischen Erscheinungen sehr bedeutend und kann eine grosse Wirkung auf die Leistungsfähigkeit des Motors ausüben.

Ein Umstand mildert jedoch wesentlich die soeben beschriebene schlechte Wirkung der toden 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 toden 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 die Sache, wenn der Motor eine Nebenschlusswickelung hat und von einer Quelle konstanter elektromotorischer Kraft gespeist wird. Da die Feldmagnete für sich von dem Strom erregt werden, welcher durch den Anker geht, kann die Selbstinduktion den Strom nicht konstant machen; es treten also an den toden Punkten plötzlich Aenderungen der Stromstärke und grosse Verluste an elektrischer Energie ein. Es ist dies von grosser, praktischer Bedeutung. Man sollte deshalb die Motoren mit II -Induktor 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 Elektromagnete sind, die besonders erregt werden, so kann der Energieverlust bis zu einem gewissen Grade dadurch verhütet werden, dass man in den Stromkreis des Ankers einen Elektromagneten einschaltet, welcher durch seine Selbstinduktion den Strom konstanter macht.

Da dieser Punkt von 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 toden Punkten stattfindet und dass zweitens bei einem Motor, dessen Feldmagnete besonders erregt werden, ein solcher Verlust stattfindet. 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 Kurve dargestellt, welche gegen die ausgezogene um 90° verschoben ist. Die resultirende elektromotorische Gegenkraft ist in jedem Punkte gleich der Summe der Ordinaten der beiden Kurven; sie wird durch die Wellenlinie ab 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 Kappschen 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 verhütet. 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 rechtwinkelig zu einander gekuppelt und hinter einander geschaltet, also nach Fig. 15: der Wirkungsgrad stellte sich nun viel höher als bei den früheren 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 Gegen-

kraft 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 Grisco Motoren, Nr. 1017 u. Nr. 1027.

Widerstand	Nr. 1017	Nr. 1027
des Ankers	0,328	0,352
der Feldmagnete	0,596	0,522
Insgesamt	0,924	0,874

Tabelle I.

Anker rechtwinklig gekuppelt, beide Feldmagnete und Anker hinter einander geschaltet.

Tourenzahl in der Minute	Stromstärke	E. M. K.	kgm am Zaum	Wirkungsgrad %
2440	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 hinter einander 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 hinter einander 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 hinter einander 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 I-Anker den Nachtheil, dass man sie mit der Hand antreiben muss, wenn sie zufällig an einem todten Punkte zum Stillstand 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 I-Muster ableiten, wenn man zwei Spulen anwendet, welche rechtwinklig zu einander stehen. Diese Anordnung ist in Figur 18 abgebildet, welche die von Hefner-Alteneck 1872 erfundene Wicklung darstellt. Der Einfachheit halber ist die Achse fortgelassen und der Kern nur angedeutet. Links vom Anker möge der Nordpol, rechts der Südpol des Feldmagneten liegen. Es möge 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 VII 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 anderen 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 äusseren Drähten besteht ($Nt = 2$) gleich

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

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

$$E_a = 8 Z \frac{n}{60} .$$

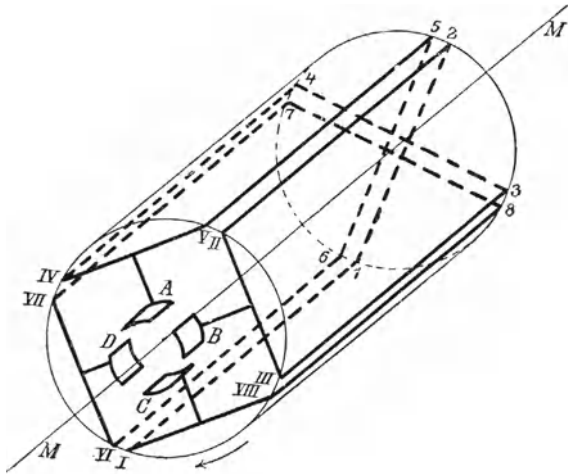


Fig. 18.

Nun ist aber 8 die Anzahl der Drähte, rund um den Anker gezählt, und wenn wir statt eines viertheiligen Kommutators einen sechstheiligen anwenden und der Kern mit drei Doppelspulen bewickelt ist, 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 konstruieren. Es sei Nt diese Zahl, alsdann ist die elektromotorische Kraft einer Dynamomaschine oder die elektromotorische Gegenkraft, welche in dem Anker eines Motors entsteht, gleich

$$E_a = N t Z \frac{n}{60} \dots \dots \dots (3).$$

Der Einfachheit halber haben wir in Figur 18 nur einen Draht bei jeder Spule gezeichnet. Es ist jedoch klar, dass, wenn man die Drahtwindungen in jeder Spule vermehrt, die elektromotorische Kraft in demselben Verhältniss wächst. Dieser Fall ist in Formel (3) schon vorgesehen, wo N die Anzahl der Spulen bezeichnet und t die Anzahl der Windungen auf jeder Spule, das Product Nt also

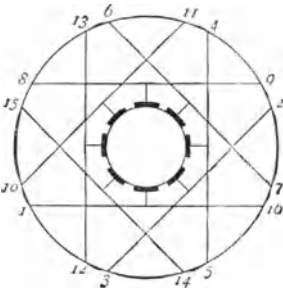


Fig. 19.

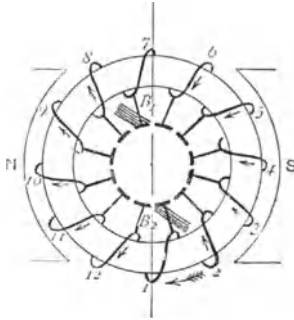


Fig. 20.

gleich der gesammten Anzahl der Drahtwindungen des Ankers ist. Ein Hefner-Alteneckscher Anker mit einem achtheiligen Kommutator ist in Figur 19 gezeichnet. Wenn wir die vorderen Enden der Ankerdrähte mit römischen Zahlen bezeichnen, die hinteren Enden mit arabischen Ziffern, so verläuft der Strom folgendermassen

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

Je grösser die Zahl der Kommutatortheile ist, um so konstanter ist die elektromotorische Kraft und die Stromstärke. Dieses System der Ankerwicklung hat den grossen Vortheil, dass fast die ganze Länge

des Drahts ausgenutzt wird; mit Ausnahme der Querwindungen an den Enden wirkt der ganze Draht. Aber es hat den praktischen Nachtheil, dass Reparaturen schwierig auszuführen sind. Wenn ein Isolationsfehler in einer der Spulen auftritt, so muss man einen grossen Theil des Drahts abwickeln, um an die schadhafte Stelle zu

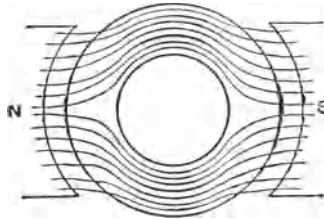


Fig. 21.

gelangen, da die Spulen, besonders an den Enden, in vielen Lagen übereinander liegen.

In dieser Beziehung ist der bekannte Grammesche oder Pacinottische Anker vorzuziehen. Hier ist ein kreisförmiger Eisenring,

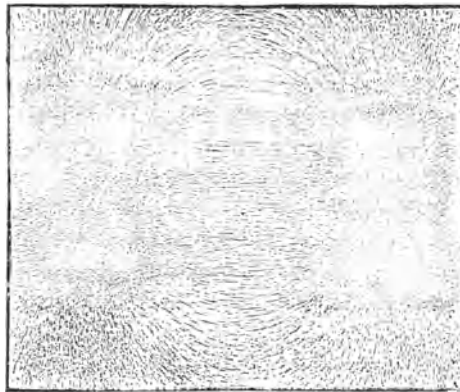


Fig. 22.

Fig. 20, in einer fortlaufenden Schraubenlinie mit isolirtem Kupferdraht bewickelt, und gewisse Punkte desselben sind durch radial verlaufende Drähte, wie unsere Figur zeigt, mit den Kommutatorsegmenten verbunden. Zwei Bürsten, B_1 und B_2 , vermitteln die Verbindung zwischen dem äusseren Stromkreis und dem Ankerdraht.

Die Wirkung des Grammeschen 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. Wenn nun ein ringförmiger Kern zwischen die Pole gebracht wird, so wird der Verlauf der Kraftlinien so geändert, dass jede Linie den Weg des geringsten Widerstandes wählt; sie wird also so lange wie möglich im Eisen verlaufen und nur an dem äusseren Umfang des Kerns durch die Luft gehen, weil sie nur hier in den Polschuh eintreten kann, Fig. 23. Da für die Kraftlinien kein Grund vorliegt, den Ankerkern an dem inneren Umfange zu verlassen, so bleibt

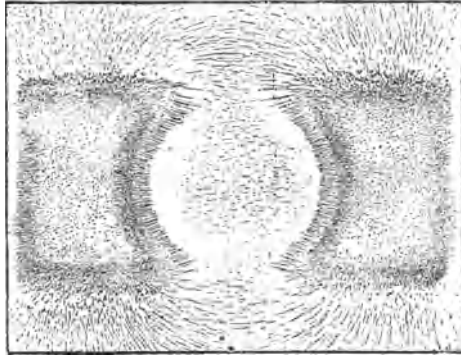


Fig. 23.

der Raum in der Mitte des Ringes fast frei von ihnen. Weil parallele Kraftlinien eine abstossende Wirkung auf einander ausüben, können in dem Fall, wo der Kern dünn ist und eine grosse Anzahl von Kraftlinien vorhanden sind, einige in dem centralen Raume verlaufen. Bei gut construirten Maschinen ist die Zahl, welche durch die Mitte geht, aber so klein, dass man sie vernachlässigen kann. Die Thatsache, dass der mittlere Raum 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 inneren 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 äusseren Drähten entstehenden elektromotorischen Kräften entgegengesetzt sind. Nach dem, was weitläufig in Bezug auf die ideale Gleichstrommaschine, Fig. 14, auseinandergesetzt ist, lässt sich die Richtung der elektromotorischen Kraft, welche in den äusseren Drähten des Grammeschen 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 anderen Seite vom Beschauer weg gerichtet sein. Die beiden Ströme, welche hieraus eutstehen, 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 in 4 und 10, welche die Kraftlinien rechtwinklig schneiden, die elektromotorische Kraft ein Maximum ist. Weil die Wicklung des Ankers aus einem Stück besteht, addiren sich die elektromotorischen 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 , welche man die negative nennt, in den Anker, theilt sich dann in die beiden erwähnten Zweige, vereinigt sich wieder bei der Bürste B_1 , welche man die positive nennt, verlässt hier den Anker und geht wieder in den äusseren 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 sich in der gezeichneten Lage — dem neutralen Durchmesser des Kommutators — befinden, so schadet dieser Kurzschluss nichts, weil keine elektromotorische Kraft in der Spule vorhanden ist; aber wenn wir die Bürsten in einen aktiven Theil des Feldes, entweder rechts oder links von den neutralen Linien, bringen würden, so würde jede Spule, wenn ihre Enden die Bürsten passirten, von einem grossen Strome durchflossen, welcher heftige Funken an den Bürsten hervorrufen und wahrscheinlich den Anker zerstören würde. 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 wurde sie einer gewissen Verzögerung zugeschrieben, womit

der eiserne Kern den Magnetismus aufnimmt und wieder verliert, aber diese Theorie ist schon längst von den meisten praktischen Elektrikern verworfen. Einige glauben, dass die Verschiebung der neutralen Linie von dem magnetisirenden Einfluss herrührt, welche der Ankerstrom auf den Eisenkern ausübt, wodurch letzterer in einen doppelten Hufeisenmagneten verwandelt wird, dessen gleiche Pole aneinander liegen und dessen Achse fast rechtwinklig auf derjenigen der Feldmagnete steht. Andere wiederum behaupten, dass die Bürsten wegen des Einflusses der Selbstinduktion in den Ankerspulen bei einer Dynamomaschine vorwärts und bei einem Motor rückwärts gesetzt werden müssen. In Wirklichkeit beeinflussen die

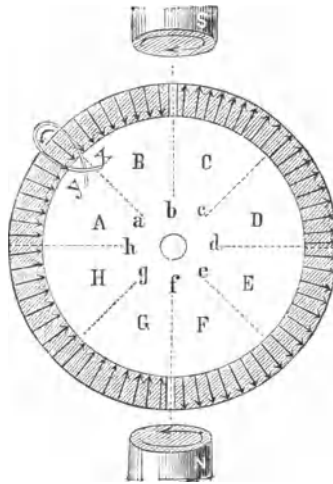


Fig. 24.

zuletzt genannten Ursachen beide die Stellung der Bürsten, wie wir weitläufiger in Kapitel IV auseinandersetzen werden.

Der erste Elektromotor, dessen Anker nach dem obigem Princip gewickelt war, wurde von Pacinotti in Pisa konstruiert und von ihm in der Zeitschrift „Il Nuovo Cimento“ im Jahre 1864 veröffentlicht. 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 Grammeschen Maschine

besteht aus Eisendraht, der in Form eines Ringes von länglichem Querschnitt aufgewickelt ist. Nachdem er der Isolation wegen mit Band umwunden ist, wird der mit Baumwolle umspinnene Kupferdraht in einer Anzahl von Spulen, welche den Kern innen und aussen vollständig bedecken, quer drüber gewickelt; der Anfang jeder Spule und das Ende der benachbarten sind mit demselben Kommutatorsegment verbunden. Darauf wird der Anker auf ein hölzernes Mittelstück aufgepasst, mittelst dessen er auf der Drehungsachse befestigt ist.

Mit Hilfe der Grundformeln, welche im vorigen Kapitel abgeleitet sind, kann man die elektromotorische Kraft des Grammeschen Ankers bestimmen. Es sei D sein Durchmesser, b seine Länge und a die radiale Tiefe des Kerns. Es möge Nt die gesammte Anzahl der äusseren Drähte längs des ganzen Umfangs bedeuten, t die Zahl der Drahtwindungen, welche auf ein Kommutatorsegment kommt und N die Anzahl der Segmente. Wenn n die Tourenzahl in der Mi-

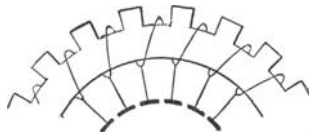


Fig. 25.

nute bezeichnet und z die gesammte Zahl der Kraftlinien, welche von einem Pol ausgehen und in eine Hälfte des Ankerumfangs eintreten, so ist die mittlere elektromotorische Kraft, die in jedem Draht entsteht, nach Gleichung (2)

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

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

$$E_a = z N t \frac{n}{60} \dots \dots \dots (4).$$

Man kann einwenden, dass dieser Ausdruck, welcher auf Gleichung (2) beruht, nur dann gilt, wenn die Bedingung, unter welcher 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 die Feldstärke nicht plötzlich, sondern allmählich von Punkt zu Punkt sich 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 passende 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 Verhältniss 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 grösseren Geschwindigkeit von n Umdrehungen in einer Minute ist, so haben wir die elektromotorische Kraft bei der geringeren Geschwindigkeit mit dem Verhältniss von $\frac{n}{60} \pi \cdot D : v$ zu multipliciren. Da $\Delta\alpha Nt = 2\pi$, so ist $v = \frac{\pi D}{Nt}$ und das Verhältniss der beiden Geschwindigkeiten ist

$$\frac{\frac{n}{60} \pi D}{\frac{\pi D}{Nt}} = Nt \frac{n}{60}.$$

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

$$\begin{aligned} E_1 &= F_1 b v \\ E_2 &= F_2 b v \\ &\vdots \\ E_{\frac{Nt}{2}} &= F_{\frac{Nt}{2}} b v. \end{aligned}$$

Die Summe aller dieser Kräfte giebt die gesammte elektromotorische Kraft des Ankers, welche wir in Zukunft 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, welcher 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 Minute haben wir deshalb

$$E_a = z N t \frac{n}{60}, \dots \dots \dots (4)$$

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

$$E_a = \frac{z}{6000} N t n 10^{-8},$$

und wenn wir die Feldstärke mit einer Einheit messen, die 6000 ma grösser ist als die absolute, so können wir die Gleichung noch mehr vereinfachen und erhalten

$$E_a = Z N t n 10^{-6}, \dots \dots \dots (5)$$

wo Z die Anzahl der Kraftlinien in dem neuen Masssystem ist, welches mit dem absolutem System durch die Gleichung

$$Z = \frac{z}{6000}$$

verbunden ist. Der Querschnitt des Ankerkerns ist $2ab$, und wenn wir die mittlere Dichte der Kraftlinien auf dem Quadratcentimeter des Ankerkerns mit m bezeichnen, so haben wir

$$Z = 2abm,$$

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

$$E_a = 2abm N t n 10^{-6} \dots \dots \dots (6)$$

Dieser Ausdruck ist oft bequemer als der erste, weil wir sogleich sehen können, wie die Dimensionen des Ankers auf die elektromotorische Kraft einwirken. Die Erfahrung hat gezeigt, dass die Dichte der Kraftlinien m in dem Anker eine gewisse Grenze nicht überschreitet, weil alsdann der Kern mit Magnetismus gesättigt ist. Diese Grenze ist $m = 4,5$, aber in der Praxis wird gewöhnlich eine geringere Dichte angenommen aus Gründen, welche im folgenden Kapitel auseinandergesetzt werden. Ein guter Durchschnittswerth für neuere Dynamomaschinen und Motoren ist $m = 3,0$; die Fläche ab muss aber dann wirklich ganz mit Eisen ausgefüllt sein, man kann nicht den Querschnitt des Kerns dafür nehmen. Denn um Energieverlust und Erwärmung zu vermeiden, muss der Ankerkern der Dynamomaschinen und Motoren in Theile zerlegt werden, welche von einander isolirt sind; die Trennungsebenen sind der Richtung der Kraftlinien und derjenigen der Bewegung parallel. Der Raum, welcher durch diese Isolirung verloren geht, muss von dem gesammten Querschnitt des Kerns abgezogen werden, und der Rest — 70 bis 90 Proc. 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 Pferdekkräfte, welche diese Energie repräsentirt, ist

$$A = \frac{1}{736} i \cdot 2 a b m N t n 10^{-6} \text{ P. S.}$$

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 und Erwärmung des Kerns herrührt, und die Rückwirkung des Ankers gegen die Magnete zu überwinden. Bei guten Dynamomaschinen steigen diese Verluste nicht über 10 Proc. und können selbst noch geringer sein.

Kapitel III.

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 ansteigt, dass man sie in der Praxis nicht anwenden kann. Der Grund hierfür liegt darin, dass bei kleinen Motoren die Polflächen 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 Feldmagneten eine grössere elektrische Energie erforderlich, als der Anker bei einer mässigen und anwendbaren Geschwindigkeit erzeugen kann. Dieser Punkt wird später noch näher betrachtet werden. Für unseren vorliegenden Zweck genügt es zu bemerken, dass rein theoretisch betrachtet, dieselbe Maschine sowohl als Motor wie als Dynamomaschine verwendet werden kann. Eine besondere Untersuchung der Theorie der Motoren könnte daher überflüssig erscheinen. Aber andererseits hat die Erfahrung gezeigt, dass, obgleich die Dynamomaschine auch als Motor benutzt werden kann, dennoch die beste Dynamomaschine nicht immer den besten Motor abgibt und, dass gewisse Einzelheiten sich ändern je nach dem

Zweck, für welchen die Maschine bestimmt ist. Die Bedingungen, welchen die Dynamomaschinen im Allgemeinen Genüge zu leisten haben, sind verschieden von denen der Motoren. Die Dynamomaschinen müssen einen hohen Wirkungsgrad haben, sie müssen ununterbrochen im Betriebe sein, ohne dass sie grössere Erwärmung erleiden oder durch ausnahmsweise hohe Stromstärken beschädigt werden; sie müssen trotz grösseren Aenderungen in der Stromabgabe gleichmässig arbeiten. Ihr Gewicht ist in der Regel von sekundärer Bedeutung; in vielen 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

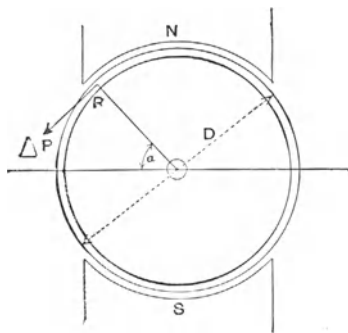


Fig. 26.

kleinen Motoren. Bei den ersten elektrischen Kraftübertragungen wurde der Unterschied zwischen den Bedingungen für die 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 genügt diese rohe Methode nicht allen gerechten Anforderungen, und es werden besondere Motoren gebaut. Deshalb ist es nothwendig geworden, die Theorie der Motoren von derjenigen der Dynamomaschinen getrennt zu behandeln.

Es seien in Fig. 26 NS die Polschuhe und D der mittlere Durchmesser eines ringförmigen Raumes, welcher von den äusseren 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 oberen Hälfte des Ankers werden von gleich-

gerichteten Strömen durchflossen, die vom Beschauer weggerichtet sein mögen, in allen Drähten der unteren Hälfte fliesst der Strom also nach dem Beschauer hin. Es sei i der Strom in jedem einzelnen Draht, und Nt die gesammte Zahl der äusseren 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 $\frac{Nt}{2}$ Drähte auf der einen Hälfte des Umfangs durchströmt, offenbar dieselbe wie diejenige einer halbkreisförmigen Stromschicht von der Gesamtstärke $\frac{Nt}{2}i$, 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 $\frac{Nt}{2}i : \frac{\pi D}{2} = \frac{Nti}{\pi D}$; der Strom, welcher in einem elementaren Querschnitt von der sehr kleinen Breite ($\Delta\alpha$) bei R fliesst, ist

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

Die mechanische Kraft, welche den elementaren Streifen unserer Stromschicht in der Pfeilrichtung zu drehen sucht, ist

$$\begin{aligned} \Delta P &= F l \Delta i \\ \text{oder } \Delta P &= F l \frac{D}{2} \Delta\alpha \frac{Nti}{\pi D}. \end{aligned}$$

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

$$\Delta P = \Delta Z \frac{Nti}{\pi D}.$$

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 unseren Zweck

ist es nicht nothwendig zu wissen, in welcher Weise die Feldstärke F an den verschiedenen Punkten sich 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 oberen halbkreisförmigen Stromschicht ausgeübt wird, oder was auf dasselbe hinauskommt, von der oberen Hälfte der Ankerwicklung, $\frac{Nt}{2}$, ist daher

$$Z \frac{N t i}{\pi D},$$

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

$$P = \frac{2 Z N t i}{\pi D}.$$

Das Drehungsmoment ist $P \frac{D}{2}$ oder

$$T = \frac{Z N t i}{\pi} \dots \dots \dots (7)$$

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

$$T = \frac{2 a l m N t i}{\pi} \dots \dots \dots (8)$$

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 bei zwei Motoren von verschiedener Grösse die Feldmagnete 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 An-

zahl der Windungen bei der grösseren Maschine grösser sein als bei der kleineren: die beiden werden sich wie die Quadrate der linearen Dimensionen verhalten. Da die Querschnitte der Anker in demselben Verhältniss stehen, so folgt, dass die Drehungsmomente sich wie die vierten Potenzen der linearen Dimensionen verhalten. Wenn also der grössere Motor die doppelten linearen Dimensionen des kleineren hat, so ist das Drehungsmoment sechzehn mal 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 Kabel verbunden: die eine wirkt als Generator, die andere, welche als Motor dient, wird mit einem Pronyschen 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 von 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 „La lumière électrique“ vom 3. October 1885, wo Marcel Deprez diesen Gegenstand behandelt, sagt er: „Wenn ein Strom durch einen Motor geht, welcher einen Pacinotti'schen Anker hat, so ist dessen Drehungsmoment unabhängig von dem Zustand der Bewegung oder Ruhe, 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 tangentielle Widerstand, welcher der Drehung entgegenwirkt, stets konstant. Man versieht den Motor mit dem Strom einer Elektrizitätsquelle (einer Batterie oder einer Dynamomaschine) und notirt die Stromstärke und elektromotorische Kraft.

Wenn letztere allmählich von Null an zunimmt, bemerken wir, dass, so lange der Motor stillsteht, der Strom in demselben Verhältniss wächst, aber sobald er einen gewissen Werth erreicht hat und der Motor sich zu drehen beginnt, wächst der Strom nicht weiter, wenn auch die Zunahme der elektromotorischen Kraft fort dauert, und in Folge davon auch die Geschwindigkeit des Motors steigt. Bei einem Versuch, welcher vor drei Jahren angestellt wurde, diente als Elektrizitätsquelle eine Grammesche Dynamomaschine und als Motor eine Hefner-Altenecksche Maschine; der Zaum war mit 2,5 kg an einem Hebelarm von 16 cm belastet. Als der Motor zu rotiren anging, zeigte die Nadel des Strommessers auf den 26. Theilstrich. Ich vergrösserte alsdann die Geschwindigkeit der Dynamomaschine, bis der Motor 32 Touren in der Sekunde machte; der Strommesser zeigte alsdann nur auf den 27. Theilstrich statt auf den 26.“

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

Tabelle siehe umstehend.

Wenn wir auf Gleichung (7) zurückgehen, so ist die mechanische Energie, welche 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

$$A = Z N t 2 i \frac{n}{60} \dots \dots \dots (9)$$

Nun geht durch jede Hälfte des Ankers der Strom i ; $2i$ ist folglich der gesammte Strom, welcher an der einen Bürste in den

Motor	Umdrehungen in der Minute	Stromstärke	<u>E. M. K.</u> Geschwindigkeit
Hefner-Alteneck }	425	13,53	0,0267
	783	12,68	0262
	1165	13,65	0278
	1660	13,00	0250
Gramme }	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	
Hefner-Alteneck }	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
Maschine mit hoher Spannung. }	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

Anker ein- und an der anderen heraustritt. Wir schreiben J_a (Ankerstrom) für $2i$ und haben alsdann

$$A = Z N t \frac{n}{60} J_a \dots \dots \dots (10)$$

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

$$E_a = Z N t \frac{n}{60} \dots \dots \dots (4)$$

ist; verbindet man beide Gleichungen, so folgt:

$$A = E_a J_a \dots \dots \dots (11)$$

Die mechanische Energie ist gleich dem Produkt von 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 Grösse 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 Masssystem 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 es die 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 Einheit der Masse an verschiedenen Orten der Erdoberfläche ein verschiedenes ist. Aber für alle Orte gelten folgende Gleichungen:

$$\begin{aligned} P &= m p, \\ G &= m g, \end{aligned}$$

wo P die Kraft ist, welche 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 für die Sekunde gegeben ist und das Gewicht in Kilogrammen, so ist die Kraft von einer Dyne

$$\begin{aligned} \text{Dyne} &= \frac{10^{-3} 10^{-2}}{g} \text{ kg oder} \\ \text{Dyne} &= \frac{10^{-5}}{g} \text{ kg.} \end{aligned}$$

Die Energie, welche eine Dyne leistet, wenn sie den Weg von einem Centimeter zurücklegt, das Erg ist daher

$$\text{Erg} = \frac{10^{-5}}{\text{g}} \text{ kgcm oder}$$

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

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

$$A = 10^{-8} \times 10^{-1} \text{ Voltampère oder}$$

$$A = 10^{-7} \text{ Watt.}$$

Um die Anzahl von Watt zu erhalten, welche eine gewisse Zahl von Erg darstellen, müssen wir also die letzteren mit 10^{-7} multipliciren. Um ferner die Anzahl von Kilogrammometer zu erhalten, welche eine gewisse Zahl von Erg darstellen, müssen wir die letzteren mit $\frac{10^{-7}}{\text{g}}$ multipliciren:

$$\text{Watt} = 10^{-7} \text{ Erg und}$$

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

Hieraus folgt

$$\text{Kilogrammometer} = \frac{\text{Watt}}{\text{g}}.$$

Die Energie, welche nöthig ist, um 75 kg in einer Sekunde ein Meter hoch zu heben, ist die Pferdestärke in dem metrischen System. Die Beschleunigung der Schwere können wir gleich 9,81 m in der Sekunde annehmen, folglich ist eine Pferdestärke

$$1 \text{ P. S.} = 75 \times 9,81 \text{ Watt oder rund}$$

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

Es möge E_a die elektromotorische Gegenkraft des Ankers in Volt bedeuten, J_a die Stromstärke in Ampère, alsdann ist die Leistung des Ankers (in P.S. ausgedrückt):

$$A = \frac{E_a J_a}{736} \text{ P. S. (12)}$$

Die Gleichungen (5) und (6) lauten ferner

$$A = \frac{1}{736} Z N t n 10^{-6} J_a \quad \text{P. S., (13)}$$

$$A = \frac{1}{736} 2 a b m N t n 10^{-6} J_a \quad \text{P. S., . . (14)}$$

Die Kraft, welche man in Wirklichkeit erhält, ist etwas kleiner, da gewisse Verluste auftreten. Diese kann man unter zwei Gesichtspunkte zusammenfassen: mechanische und magnetische Reibung. Die erstere setzt sich zusammen aus der Reibung in den Lagern, derjenigen zwischen Kommutator und Bürsten und dem Widerstande, welche die Luft der Rotation des Ankers entgegensetzt. Die magnetische Reibung ist etwas complicirterer Natur, sie zeigt sich in verschiedener Weise, besonders aber in der 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, welche desto stärker sind, je stärker das magnetische Feld und je grösser die Geschwindigkeit ist. Es ist gerade, als ob in dem Motor sich eine Dynamomaschine befindet, die kurz geschlossen ist und als ob die Kraft, welche nöthig ist, um diese Ströme zu erzeugen, von dem Strom geliefert werden muss, der durch die Ankerwindungen fliesst; diese Kraft geht natürlich alsdann für die Nutzarbeit verloren. Eine andere Quelle des Kraftverlustes 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 continuirliche halbkreisförmige Stromschicht ersetzt werden könne. Diese Annahme ist streng genommen nur richtig, wenn 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, welche aus sehr vielen Drahtwindungen besteht, so erzeugt der Wechsel des Kontaktes zwischen Bürsten und 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 in Folge dessen starke Schwingungen, deren Amplitude gleich dem Winkelabstand zweier benachbarter Spulen ist. Es scheint, als ob ein rechtwinklig zu der Mittellinie der Polschuhe aufgestellter Magnet in schnelle Schwin-

gungen versetzt wird, und da jeder Magnet, welcher in der Nachbarschaft von Metallmassen sich bewegt, diese erwärmt und dadurch Kraft verzehrt, so folgt, dass die Polschuhe warm werden müssen und dass ein Theil der vom Motor erzeugten Energie auf diese Weise verloren geht. Aus dem Gesagten geht hervor, dass der Verlust dadurch verkleinert werden kann, dass man die Anzahl der Kommutatorsegmente vermehrt und das Metall der Polschuhe nach Ebenen theilt, welche auf der Achse des Ankers rechtwinklig stehen.

Eine andere Verlustquelle ist bei einigen Motoren die Diskontinuität des Ankerkernes. Bei Grammeschen Ankern mit weichem cylindrischen Kern ist es nicht der Fall, aber wohl bei Ankern von der Pacinottischen 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 retardirende Kraft auf den Vorsprung ausüben. Dass dies wirklich der Fall ist, kann man in schlagender Weise bei vielen Dynamomaschinen nachweisen, welche Pacinottische Vorsprünge haben, besonders bei den Brush- und Weston-Maschinen. 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 entfernen 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 Pacinottischen Vorsprüngen sind sehr beliebt bei den Konstrukteuren von Motoren, weil man glaubt, dass sie die magnetische Anziehung vergrössern, welche die Kraft des Motors bestimmt. Aus rein theoretischen Gründen betrachtet, verhält sich die Sache auch so. Wir werden sogleich zeigen, dass die Anzahl der Kraftlinien Z , welche vom Polschuh zum Anker gehen, um so grösser ist, 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 äusseren Oberfläche des Zahnes und der inneren Oberfläche der Polschuhe viel grösser zu machen, als für eine freie Rotation des

Ankers ausreicht, und man kann daran zweifeln, ob nach alledem der Pacinottische Kern eine so grosse Verbesserung gegen den Grammeschen bedeutet, wie er es aus rein theoretischen Gründen zu sein scheint.

Es giebt noch eine andere Verlustquelle selbst bei Ankerkernen, welche vollständig getheilt und an der Aussenseite keine Vorsprünge tragen. Sie rührt von derjenigen molekularen Wirkung im Eisen her, welche von Ewing als Hysterisis 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 Gesamtsumme aller hier aufgezählten Verluste höchstens nur ein kleiner Bruchtheil der gesammten Kraft. Das Verhältniss des Verlustes zur wirklich an der Welle erhaltenen Kraft wird der Wirkungsgrad der Umsetzung genannt, er sollte bei mittleren und grossen Motoren nie kleiner als 90 % sein.

Der elektrische Wirkungsgrad des Motors ist das Verhältniss der inneren Energie (in P.-S.), wie sie durch die Formeln (13) und (14) angegeben wird, zu der Grösse der äusseren Energie (in P.-S.) 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 Feldmagnete einer Hauptstrommaschine,

W_n der Widerstand der Feldmagnete einer Nebenschlussmaschine.

J, J_a, J_n und J_d mögen bezw. die Stärke des äusseren Stroms, des Stroms im Anker und in der Wicklung der Feldmagnete einer Hauptstrom- und Nebenschlussmaschine bezeichnen.

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

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

$$J_a = J_d + J_n \dots \dots \dots (15)$$

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

$$E_k = E_b - W_d J_d \dots \dots \dots (17)$$

Der elektrische Wirkungsgrad ist

$$\eta = \frac{E_k J}{E_a J_a} \dots \dots \dots (18)$$

Für einen Elektromotor mit gemischter Wicklung sind die Gleichungen

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

$$J_a = J_d - J_n, \dots \dots \dots (19)$$

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

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

$$\eta = \frac{E_a J_a}{E_k J} \dots \dots \dots (22)$$

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

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

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

Für den Motor haben wir

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

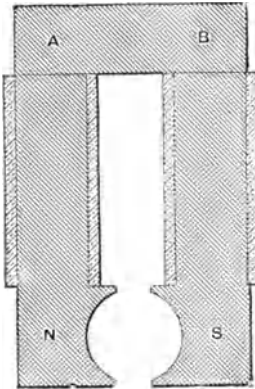
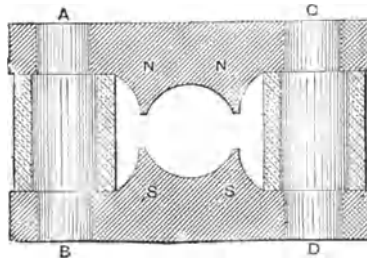
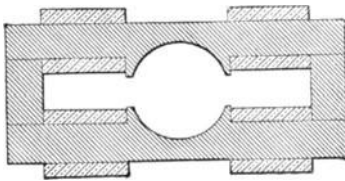
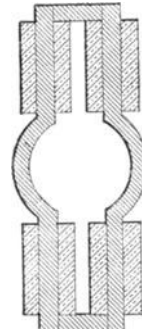
und Gl. (20), (21) und (22) bleiben ungeändert.

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

Kapitel IV.

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. — Kurven, längs denen die Anzahl der Pferdestärken konstant ist. — Geschwindigkeitscharakteristiken. — Anwendung auf elektrische Bahnen. — Statische und dynamische elektromotorische Kraft und Gegenkraft.

Im vorhergehenden Kapitel haben wir gezeigt, wie die elektromotorische Kraft eines Ankers gefunden werden kann, wenn die gesamte Anzahl der Kraftlinien, welche durch seinen Kern geht, bekannt ist. Es ist nun nöthig, aus den Dimensionen der Maschine die Anzahl der Kraftlinien zu bestimmen, d. h. die Stärke des magnetischen Feldes. Bevor wir jedoch eine wissenschaftliche Untersuchung dieses Gegenstandes beginnen, 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 dem Hefner-Alteneckschen Princip gewickelt ist und welche wir im II. Kapitel (Fig. 18 und 19) beschrieben haben; 2. den Cylinderring, welcher nach dem Pacinottischen oder Grammeschen Princip gewickelt ist und welchen wir ebenfalls im II. Kapitel (Fig. 20 und 25) besprochen und 3. den Flachring, welcher auch nach Pacinottischem oder Grammeschem Princip gewickelt ist und sich nur durch die Form des Kerns von dem vorhergehenden unterscheidet.

Edison-HopkinsonFig. 27.
Trommel.*Manchester.*Fig. 28.
Kurzer Cylinder.*Crompton.*Fig. 30.
Cylinder.*Siemens.*Fig. 29.
Trommel.

Alle Magnete, welche man bei Dynamomaschinen und Motoren anwendet, sind hufeisenförmig; gerade Stabmagnete mit Polen an den Enden werden nie gebraucht. Wir müssen in allen Fällen entgegengesetzte Pole an denselben Anker nahe heranbringen, und das macht die Anwendung eines gebogenen Magneten nothwendig. Man muss zwischen einfachen, doppelten und mehrfachen Magneten unterscheiden. Bei dem einfachen Hufeisenmagnet gehen alle Kraftlinien, welche den Anker durchlaufen, in derselben Richtung durch den Magneten. Als Beispiel können wir die Edison-Hopkinson-Dynamomaschine betrachten, Fig. 27. 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

Elwell Parker.

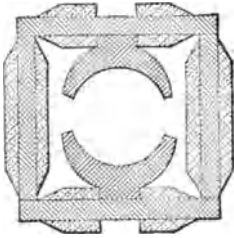


Fig. 31.
Cylinder.

Elwell-Parker.

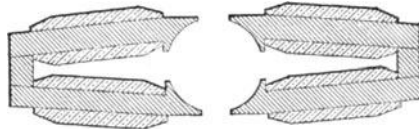


Fig. 32.
Langer Cylinder.

Paterson und Cooper.

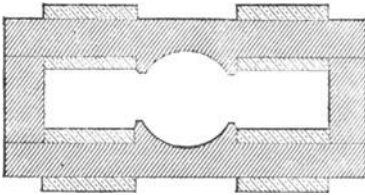


Fig. 33.
Kurzer Cylinder.

Goolden und Trotter.

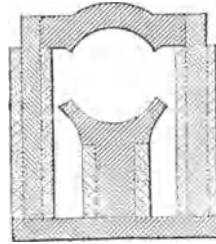


Fig. 34.
Kurzer Cylinder.

Goolden und Trotter. Gramme.

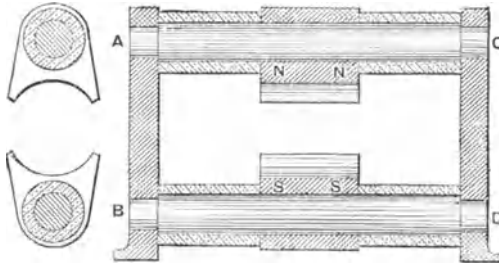


Fig. 35.
Kurzer Cylinder.

Andrews.

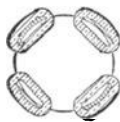


Fig. 36.

Kurzer Cylinder.

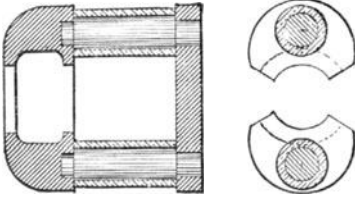
Jones.

Fig. 37.
Kurzer Cylinder.

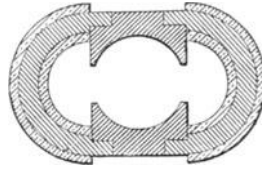
Kapp.

Fig. 38.
Cylinder.

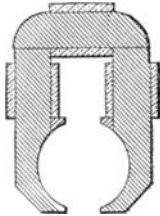
Kapp.

Fig. 39.
Cylinder.

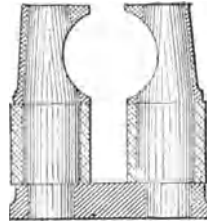
Kapp.

Fig. 40.
Kurzer Cylinder

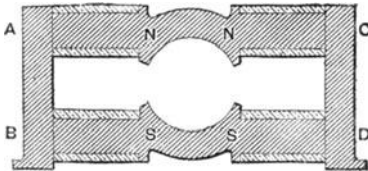
Weston.

Fig. 41.
Trommel.

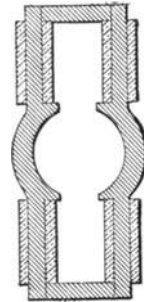
Maxim.

Fig. 42.
Cylinder.

nach N. Ein freier Magnetpol würde sich längs eines geschlossenen magnetischen Kreises NSBAN bewegen und könnte keinen anderen 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,

Thomson-Houston.

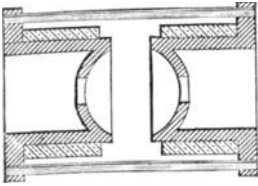


Fig. 43.
Kugel.

Schuckert.

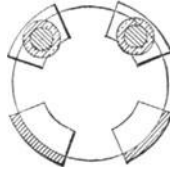


Fig. 44.



Fig. 45.

Flachring.

Brush.

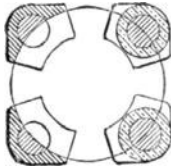


Fig. 46.



Fig. 47.

Flachring.

Gramme.

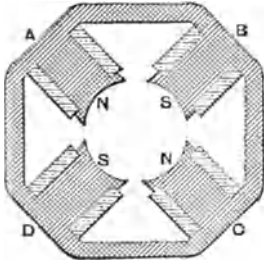


Fig. 48.
Cylinder.

De Meritens.

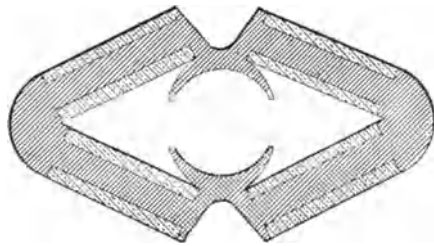


Fig. 49.
Cylinder.

Jürgensen.

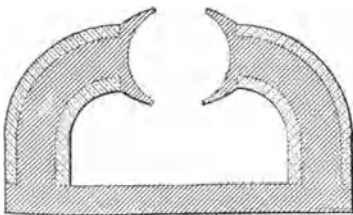
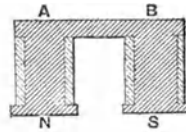


Fig. 50.
Cylinder.

Marcel-Deprez.



a-----*b*

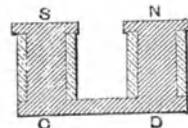


Fig. 51.
Zwei Cylinder.

der andere längs NSDCN oder mit anderen 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 so auffassen, als ob die Feldmagnete aus zwei Hufeisen beständen, welche sich mit gleichen Polen berühren. Die Anordnung der Manchester-Dynamomaschine ist ähnlich, aber in diesem Falle bilden die Stücke AB und CD, welche bei der Westonschen Maschine das Joch bilden, die erregenden Theile der Magnete und sind deshalb von den Magnetisirungsspulen umgeben. Die Feldmagnete der ursprünglichen Grammeschen Dynamomaschine bestehen ebenfalls aus einem doppelten Hufeisen. Aber hier geht die Ebene, welche man durch die Mittellinie der Magnetkerne legen kann, auch durch die Mittellinie der Ankerwelle, während sie bei den Westonschen Typus senkrecht darauf steht. Hier spalten sich ferner die Kraftlinien rechts und links von der vertikalen Mittellinie in zwei verschiedene Kreise. Fig. 37 zeigt eine ähnliche Anordnung, aber nur mit einem Magneten. Fig. 39, 40 und 50 zeigen einfache Magnete, und die Ebene des Hufeisens steht hier auf dem Anker senkrecht. Fig. 48 zeigt einen vierfachen Hufeisenmagnet. Hier gehören die Kraftlinien, welche durch den Anker gehen, vier verschiedenen Kreisen an: SDAN, SDCN, SBAN und SBCN. Die Feldmagnete der Schuckertschen Maschine, welche in Fig. 44 und 45 dargestellt werden, bestehen aus acht vollständigen Hufeisen, vier auf jeder Seite des Flachrings; bei einigen multipolaren Maschinen ist die Zahl der verwendeten magnetischen Kreise noch grösser. Die Maschinen, welche Marcel Deprez bei seinen Versuchen benutzte, Fig. 51, hatten zwei Ringanker, welche auf derselben Achse AB befestigt waren und längst 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.

Aus dem oben Gesagten geht hervor, dass es die eigentliche Aufgabe der Feldmagnete ist, Kraftlinien zu erzeugen, welche den Ankerkern durchsetzen. Alle anderen Kraftlinien, welche an dem Anker vorbeigehen, sind nutzlos und selbst schädlich für die Leistungsfähigkeit der Maschine. Je grösser die Anzahl der nützlichen Kraftlinien ist, um so grösser ist die elektromotorische Kraft, welche bei einer gegebenen Geschwindigkeit in einem gegebenen Anker

entsteht. Es sollte daher unser Ziel sein, ein Maximum von Kraftlinien zu erzeugen, und um diese Forderung zu erfüllen, müssen wir zuerst die Beziehung zwischen der Anzahl der Kraftlinien und den konstruktiven Daten der Maschine bestimmen. Zu ihnen gehört die erregende Kraft, d. h. das Produkt aus den Drahtwindungen des Magneten und dem magnetisirenden Strom, welcher durch den Draht fliesst. Man rechnet die erregende Kraft gewöhnlich nach Ampèrewindungen und hat experimentell und theoretisch gezeigt, 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 haben oder wenige Windungen dicken Drahts und eine hohe Stromstärke. Die Wirkung ist stets dieselbe, wenn das Produkt aus der Zahl der Ampère und der Windungen gleich ist. Der Versuch zeigt ferner, dass für geringe Magnetisierungsgrade die im Anker hervorgerufene elektromotorische Kraft der erregenden Kraft X der Feldmagnete nahezu proportional ist; und da die elektromotorische Kraft und die Feldstärke Z immer proportional sind, 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 hervorggerufen wird, ist gleich dem Quotienten von magnetisirender Kraft und diesem Widerstand. Wenn wir den letzteren mit R bezeichnen, so haben wir

$$Z = \frac{X}{R} \dots \dots \dots (23).$$

Diese Formel ist streng richtig, wenn es uns gelingt, für jeden Magnetisierungsgrad 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 Magnetisierungsgrade wächst der Widerstand und die Beziehung zwischen Z und X wird complicirter. 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 und diese Bedingung wird allgemein so ausgedrückt, dass man sagt, der Magnet sei gesättigt.

Die Beziehungen, welche zwischen magnetisirender Kraft und magnetischem Moment bestehen, sind für den Fall von Stabmagneten, Kugeln und Ellipsoiden von Jakobi, Dub, Müller u. a. untersucht, und es sind eine Menge Formeln aufgestellt, um diese Beziehungen mathematisch auszudrücken. Abgesehen von der Thatsache, dass die Formeln nurrohe Annäherungen sind, welche meistens unvollkommen mit den Resultaten der Versuche übereinstimmen, sind sie für praktische Zwecke fast unnütz, da 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 Edisonschen Maschinen anführen können. Nach der Theorie ist das magnetische Moment eines cylinderförmigen Stabes proportional einer Funktion der erregenden Kraft, der Quadratwurzel des Durchmessers und der Quadratwurzel aus der dritten Potenz der Stablänge. Um also ein Maximum des magnetischen Moments bei einem gegebenen Eisengewicht zu erhalten, müssen wir ihm die Gestalt eines langen Cylinders geben; die ursprünglichen Edisonschen Maschinen waren nach diesen Grundsätzen gebaut. Die Erfahrung hat uns jedoch gelehrt, dass dies die möglichst schlechteste Form war, welche man annehmen konnte, und die später gebauten Edisonschen Maschinen haben deshalb starke und kurze Magnete. Die Erklärung für diesen offenbaren 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, welche 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 Formen von Magneten aufgestellt würden, welche wirklich bei der Konstruktion von Dynamomaschinen und Motoren verwendet werden. Es sind jedoch noch keine strenggültigen Formeln für alle Magnetisirungsgrade gefunden worden, und die Schwierigkeit liegt hauptsächlich in der Thatsache, dass die chemische Zusammensetzung und die molekularen Eigenschaften des Eisens hierbei eine wichtige Rolle spielen, welche nicht leicht im Voraus bestimmt werden kann. Dies ist besonders der Fall, wenn die Magnetisirung bis zur Sättigungs-

grenze getrieben wird. Für niedrige Magnetisierungsgrade sind die Schwierigkeiten auch noch vorhanden, aber sie sind verhältnissmässig von geringerer Bedeutung, und es ist möglich, Formeln für die Feldstärke aufzustellen, welche für praktische Zwecke hinreichend genau sind.

Es mögen in Fig. 52 eine Reihe keilförmiger und sehr kurzer Magnete $M_1, M_2 \dots$ so aufgestellt sein, dass sie sich mit entgegengesetzten Polflächen berühren und einen continuirlichen Ring bilden, welcher 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 Elementarmagneten gleich S sein, und die Dichtigkeit der magnetischen Masse, welche wir uns

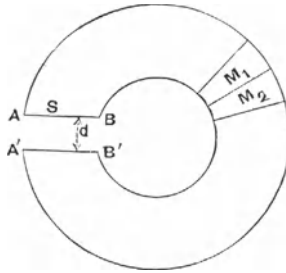


Fig. 52.

über die Polfläche vertheilt denken, gleich σ ; alsdann ist σS die Stärke jeder Polfläche. Nach der Ampèreschen Theorie kann jeder Elementarmagnet durch eine äquivalente magnetische Fläche (Seite 23) ersetzt werden, die aus einem geschlossenen Stromkreis besteht, in dem ein Strom fließt, dessen Stärke multiplicirt mit der eingeschlossenen Fläche dem magnetischen Moment des Elementarmagneten gleich ist. Denken wir uns nun die Magnete durch Drahtspiralen oder Solenoide ersetzt, so können wir, ohne einen merklichen Fehler zu begehen, jede Drahtwindung der Spirale als einen in sich geschlossenen Stromkreis betrachten, und wenn wir n solcher Windungen haben und der Strom gleich J ist, so ist das gesammte magnetische Moment in absolutem Masse gleiche nJS . Da mit Ausnahme der beiden Endflächen AB und A_1B_1 die Polflächen sich berühren und keine Wirkung in die Ferne ausüben können, so wird das gesammte magnetische Moment der Reihe von Elementar-

magneten durch das Produkt des Magnetismus auf den Endflächen und deren Entfernung d dargestellt. Wir haben deshalb die Gleichung

$$\sigma S d = n J S.$$

Wir haben gezeigt (Seite 20), dass die Anzahl aller Kraftlinien, welche vom Einheitspol ausgehen, gleich 4π ist. Von einem Pol, dessen Stärke gleich σS ist, gehen also $4\pi\sigma S$ Kraftlinien aus. Es möge Z die Anzahl aller Kraftlinien oder die Feldstärke in dem Luftzwischenraum sein, dann haben wir

$$Z = 4\pi\sigma S,$$

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

$$Z = \frac{4\pi n J S}{d} \text{ oder}$$

$$Z = 4\pi \frac{n J}{\frac{d}{S}}.$$

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

Bei der Ableitung der Formel für Z 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 Verhältniss 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 von der Länge des Ankers b und dem Bogen λ , welcher von jedem Pol eingenommen wird. Es möge δ die Entfernung zwischen der Polfläche der Magnete und der äusseren Oberfläche des Ankerkerns sein und X gleich der erregenden Kraft, welche Z Kraftlinien hervorbringt; alsdann geht die obige Formel über in

$$Z = 4\pi \frac{X}{\frac{2\delta}{\lambda b}} \text{ oder}$$

$$Z = \frac{X}{\frac{2 \delta}{4 \pi \lambda b}} \dots \dots \dots (24)$$

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 Ohmschen 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 2δ multiplicirt und durch den Querschnitt λb 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; um sie in dem Masse zu erhalten, das direkt die Bestimmung der elektromotorischen Kraft nach Gleichung (5) erlaubt, müssen wir sie durch 6 000 dividiren. Drückt man δ , λ und b in Centimeter und X in Ampèrewindungen aus, statt in absolutem Mass, so erhält man:

$$Z = \frac{X}{740 \frac{2 \delta}{\lambda b}} \dots \dots \dots (24a).$$

Diese Formel ist nur unter der Voraussetzung zutreffend, dass es keinen anderen 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 anderen Stoffe. Die verschiedenen Stoffe 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; Kupfer hat eine grössere als Luft. Die magnetische Permeabilität jedes Stoffes kann daher durch einen Koeffizienten μ ausgedrückt werden, welcher seine Permeabilität im Verhältniss 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

$$Z = \frac{\mu X}{\frac{2 \sigma}{4 \pi \lambda b}} \dots \dots \dots (24b)$$

und da bei einer Dynamomaschine ein Theil des Zwischenraums zwischen den Polen mit Kupfer ausgefüllt ist, welches die Wicklung des Ankers bildet und da die Permeabilität des Kupfers grösser als 1 ist, so verringert sich der magnetische Widerstand dieses Zwischenraums. Wir müssen deshalb erwarten, dass die Zahl im Nenner der Formel (24a) in Wirklichkeit etwas kleiner als 740 ist. Aus einer grossen Anzahl von Versuchen, welche vom Verfasser bei Dynamomaschinen verschiedener Grösse und Form angestellt worden sind, ergibt sich, dass der Widerstand des Raumes zwischen den Polen, welcher Luft und Kupfer enthält, genauer durch

$$567 \frac{2 \sigma}{\lambda b}, \text{ als durch } 740 \frac{2 \sigma}{\lambda b}$$

dargestellt wird.

Der Widerstand des Zwischenraums der Pole ist jedoch nicht die einzige passive Kraft, welche der Entstehung der Kraftlinien entgegenwirkt. Nach dem, was wir über die magnetische Permeabilität der verschiedenen Substanzen sagten, ist es klar, dass diese Widerstände durch Ausdrücke von der Form, Länge dividirt durch Querschnitt, dargestellt werden können, wenn man ausserdem diesen Quotienten noch mit einem Koeffizienten multiplicirt, welcher von der Qualität des Eisens abhängig ist. Es möge in Fig. 53 L die mittlere Länge der Feldmagnete bedeuten und A B den Querschnitt des Magnetkerns. In derselben Weise bedeute l die durchschnittliche Länge des Ankerkerns, welcher ein Grammescher Cylinder sein möge, und a b den Querschnitt seines Kerns. Der magnetische Widerstand eines einfachen Hufeisenmagneten ist dann proportional $\frac{L}{AB}$ und der des Ankers $\frac{l}{2 a b}$, wo jeder Quotient noch mit einem von der Beschaffenheit des Eisens abhängigen Koeffizienten zu multipliciren ist. Nach zahlreichen Versuchen hat der Verfasser gefunden, dass für Dynamomaschinen und Motoren von diesem Typus, welche aus gut ausgeglühtem Schmiedeeisen hergestellt sind, die Feldstärke für niedrige Magnetisierungsgrade durch den Ausdruck

$$Z = \frac{X}{567 \frac{2 \sigma}{\lambda b} + \frac{1}{2,54 a b} + \frac{2 L}{2,54 A B}} \dots (25)$$

dargestellt wird. Es ist dies eine rein empirische Formel, was die Konstanten anbelangt, aber es ist interessant, dass dieselbe Formel auf theoretischem Wege gefunden werden kann, wenn wir eine Permeabilität von $\mu = 940$ für das Eisen der Feldmagnete und des Ankers annehmen; dies ist thatsächlich ein Werth, welcher niedrigen Magnetisierungsgraden entspricht. Für Magnete aus Gusseisen kann folgende empirische Formel benutzt werden:

$$Z = \frac{X}{887 \frac{2 \rho}{\lambda b} + \frac{l}{2,03 a b} + \frac{3 L}{2,03 A B}} \dots (26)$$

Bei doppelten Hufeisenmagneten, wie sie Fig. 54 zeigt, führt

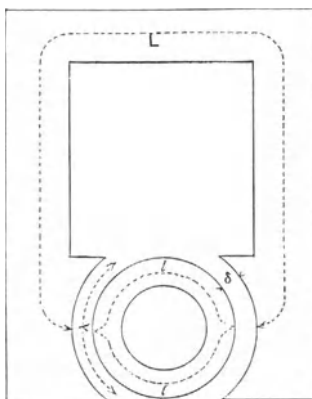


Fig. 53.

ein Hufeisen die Hälfte aller Kraftlinien, und wir haben deshalb für Schmiedeeisen

$$\frac{Z}{2} = \frac{X}{567 \frac{2 \rho}{\lambda b} + \frac{2 l}{2,54 a b} + \frac{2 L}{2,54 A B}} \dots (27)$$

und für Gusseisen

$$\frac{Z}{2} = \frac{X}{887 \frac{2 \rho}{\lambda b} + \frac{2 l}{2,03 a b} + \frac{3 L}{2,03 A B}} \dots (28)$$

Die erregende Kraft, welche nöthig ist, um eine gewisse Feldstärke hervorzubringen, kann man finden, wenn man die Zahl der Kraftlinien mit dem magnetischen Widerstand multiplicirt, welcher den Nenner in den obigen vier Gleichungen darstellt. Man muss aber berücksichtigen, dass diese nur dann gelten, wenn der Grad

der Magnetisierung nicht zu hoch ist, also wenn nicht über 1,6 Kraftlinien auf das Quadratcentimeter kommen. Für grössere Feldstärken wächst der magnetische Widerstand der Eisenteile des magnetischen Kreises bedeutend und in der Praxis findet man, dass 40 bis 100% an erregender Kraft mehr aufgewendet werden muss, als die obigen Formeln angeben, wenn man die Feldmagnete der Dynamomaschinen und Motoren fast auf den Sättigungsgrad bringen will. Eine Methode, nach der man die erregende Kraft für jeden Grad der Magnetisierung genauer bestimmen kann, wird weiter unten angegeben.

Es ist eine Frage von grosser praktischer Wichtigkeit, ob die Anwendung eines einfachen oder eines doppelten Magneten vorteilhafter ist. Da bei dem letzteren der Querschnitt des Luftzwischenraums nur halb so gross ist, als beim ersten, so wird der Widerstand desselben verdoppelt. Wenn man die Gleichungen (25) und

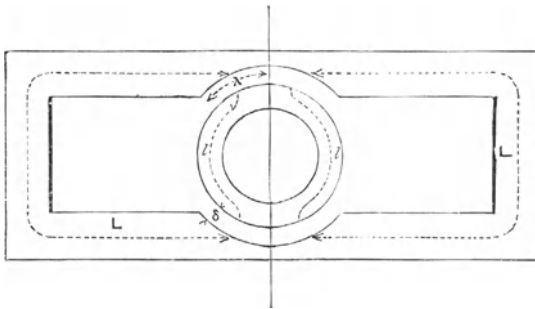


Fig. 54.

(27) vergleicht, so folgt, dass der magnetische Widerstand des Magneten in beiden Fällen gleich ist und dass der magnetische Widerstand des Ankers und der Luft bei dem doppelten Hufeisen ungefähr doppelt so gross ist, als bei dem einfachen. Andererseits geht nur die Hälfte aller Kraftlinien durch einen Magneten des doppelten Hufeisens, und deshalb ist die erregende Kraft in dem einfachen und doppelten Magneten dieselbe. Aber in letzterem Falle muss die erregende Kraft auf jedes der beiden Hufeisen wirken, während sie bei dem einen Magneten auf ein Hufeisen von doppeltem Querschnitt wirken muss. Die Länge des erforderlichen Drahts verhält sich daher wie $2:\sqrt{2}$; es kann also bei einem einfachen Magneten 25% an Draht gespart werden. Dagegen ist das Eisengewicht eines einfachen Magneten etwas grösser, als das eines äquivalenten doppelten, und in Fällen, wo ein geringes Gesamtgewicht von Bedeutung

ist, wie z. B. bei Motoren für Fahrzeuge, ist der doppelte Magnet doch im Vorthail, obgleich er mehr Draht erfordert.

Eine Betrachtung der Formeln (25) bis (28) zeigt auch, warum kleine Motoren oft nicht als Dynamomaschinen wirken können, wie wir schon im Anfang des dritten Kapitels erwähnten. Bei diesen Maschinen, oder besser gesagt, bei diesen Maschinenmodellen sind die Polflächen λb sehr klein im Vergleich zu der Länge des Luftzwischenraums δ , und folglich ist der magnetische Widerstand des Luftzwischenraums sehr gross. Die erregende Kraft ist also auch im Verhältniss zur Feldstärke sehr hoch, und es kann vorkommen, dass die elektrische Energie, welche zur Erzeugung einer so grossen erregenden Kraft erforderlich ist, grösser ist als die elektrische Energie, welche überhaupt von dem Anker erzeugt werden kann. In diesem Falle wirkt der Motor überhaupt nicht als Dynamomaschine.

Da die elektromotorische Kraft für eine gegebene Umdrehungsgeschwindigkeit der Feldstärke proportional ist und da diese ihrerseits wieder von der erregenden Kraft abhängt, so folgt, dass bei jeder Dynamomaschine und jedem Motor eine bestimmte Beziehung besteht zwischen der elektromotorischen Kraft, der Ankerwicklung und den Ampèrewindungen der Feldmagnete. Wie wir schon auseinandersetzen, ist diese Beziehung von zu complicirter Art, als dass sie sich in eine mathematische Formel bringen liesse, welche auf alle Fälle streng anwendbar ist. Näherungsformeln sind von Frölich, Clausius u. a. aufgestellt, aber sie sind für praktische Zwecke nicht hinreichend genau und haben ausserdem den Nachtheil mit allen analytischen Methoden gemeinsam, dass sie wenig anschaulich sind. In dieser Beziehung sind graphische Methoden vorzuziehen, und bei der Lösung von Aufgaben, welche Dynamomaschinen und Motoren betreffen, sind sie bedeutend leichter zu verwenden, als jede analytische Behandlung. Man kann alle wichtigen Eigenschaften einer Maschine durch Kurven darstellen, und da diese Eigenschaften einen bestimmten Charakter darstellen, wodurch sie sich von anderen Maschinen ähnlicher Art unterscheidet, so werden diese Kurven Charakteristiken¹⁾ genannt. Die Beziehungen zwischen Stromstärke, elektromotorischer Kraft, Geschwindigkeit,

¹⁾ Diesen Namen scheint zuerst Marcel Deprez im Jahre 1881 in „La Lumière Electrique“ gebraucht zu haben; Hopkinson wandte jedoch zuerst die graphischen Methoden bei den Dynamomaschinen an.

Arbeit, Wirkungsgrad u. s. w. können alle graphisch dargestellt werden, aber die am häufigsten angewandte Kurve ist die, welche die elektromotorische Kraft als Funktion der erregenden Kraft für eine konstante Geschwindigkeit darstellt. Bei der Hauptstromdynamomaschine ist die erregende Kraft der Stromstärke proportional, und wenn wir die Stromstärken als Abscissen auftragen und die entsprechenden elektromotorischen Kräfte der Ankerwicklung als Ordinaten, so erhalten wir die Kurve, welche man gewöhnlich als innere Charakteristik bezeichnet, Die äussere Charakteristik ist die Kurve, welche die Klemmenspannung der Dynamomaschine als Funktion der Stromstärke darstellt, und der Abstand entsprechender Punkte auf den beiden Kurven stellt den Spannungsverlust dar, welcher durch den inneren Widerstand der Maschine bedingt wird.

Bevor wir dazu übergehen, die graphischen Methoden auf die Bestimmung der Bedingungen anzuwenden, unter denen die Dynamomaschinen und Motoren arbeiten, ist es nützlich zu zeigen, wie die Charakteristik einer gegebenen Maschine aus ihren konstruktiven Daten bestimmt wird und wie umgekehrt eine Maschine construiert werden muss, damit sie eine gewünschte Charakteristik aufweist. Die Lösung dieser Aufgabe kommt im Allgemeinen darauf hinaus, die Charakteristik einer Dynamomaschine durch Rechnung im voraus zu bestimmen¹⁾. Die Ordinaten einer gewöhnlichen Charakteristik, welche durch den Versuch bestimmt wird, stellt die Klemmenspannung für konstante Geschwindigkeit und variable erregende Kraft dar. Um die Geschwindigkeit zu eliminieren, können wir aus dieser Kurve eine andere ableiten — die Charakteristik der Magnetisirung — bei welcher die Abscissen wie vorher die erregende Kraft darstellen, und die Ordinaten die Anzahl aller Kraftlinien, welche durch den Anker gehen. Diese Charakteristik wollen wir nach der Konstruktion der Maschine vorherbestimmen.

Die Anzahl der Kraftlinien Z , welche durch die Formeln (25) bis (28) angegeben wird, scheint von einer Art magnetomotorischen Kraft (welche durch die erregende Kraft X dargestellt wird) in ähnlicher Weise abzuhängen, wie die Stromstärke von der elektromotorischen Kraft. Es ist hier das Ohmsche Gesetz auf den mag-

¹⁾ Vergl. des Verfassers Abhandlung „The Pre-Determination of the Characteristics of Dynamos“. (Journal of the Soc. of Telegraph Engineers and Electricians, Vol. XV, Nr. 64, 518. 1887.)

netischen Kreis übertragen. Es bestehen jedoch einige wichtige Unterschiede. Erstens fliesst der elektrische Strom nur längs bestimmt abgegrenzten Wegen, nämlich nur in den Leitern und nicht durch den umgebenden Raum. Die magnetischen Kraftlinien sind dagegen keineswegs auf die Eisentheile allein beschränkt, obwohl der grösste Theil in den Eisentheilen des magnetischen Kreises verläuft, sie gehen auch durch den umgebenden Raum. Mit anderen Worten, wir können für den Magnetismus keine Isolirung herstellen, wohl aber für elektrische Ströme. Der zweite Unterschied besteht darin, dass, während der elektrische Widerstand eines Leiters konstant und unabhängig von der Stromstärke ist (vorausgesetzt, dass die Temperatur sich nicht ändert), der magnetische Widerstand des Eisens mit der Anzahl der Kraftlinien wächst, und zwar ist der Zuwachs anfangs klein, nimmt nachher aber immer mehr zu, bis er bei der Sättigung des Eisens unendlich gross wird. Ein dritter Unterschied besteht darin, dass, während ein elektrischer Strom unter Energieaufwand Wärme in dem Leiter erzeugt, der Verlauf von magnetischen Kraftlinien im Eisen keine Wärme hervorruft und keine Energie absorbiert. Wegen dieser Eigenschaft des magnetischen Stromkreises haben einige Forscher vorgeschlagen, die Benennung „magnetischer Widerstand“ aufzugeben, da die Ueberwindung eines Widerstandes einen Aufwand von Energie erfordert, welcher bei einem magnetischen Widerstand sicher nicht stattfindet. Die Energie, welche bei der Magnetisirung der Feldmagnete einer Dynamomaschine oder eines Motors aufgewendet wird, rührt nicht von einer magnetischen Eigenschaft der Maschine her, sondern einfach von dem elektrischen Widerstand der Magnetisirungsspiralen. Der Ausdruck „magnetischer Widerstand“ ist jedoch so allgemein verbreitet und ist so zweckmässig, dass der Versuch, ihn durch einen mehr wissenschaftlichen zu ersetzen, zu Verwirrung führen würde; wir werden ihn daher im Folgenden in seinem gewöhnlichen Sinne gebrauchen.

Um die Analogie des magnetischen und elektrischen Stromkreises zu erklären, wollen wir uns nun denken, dass an Stelle der Schenkel des Feldmagneten, Fig. 53, zwei Batterien treten, an die Stelle des Joches ein Draht, an die Stelle des Ankers ein gewisser Widerstand R_A , welcher auf beiden Seiten mit den Klemmen der Batterie durch Drähte von hohem Widerstand, $\frac{R_\alpha}{2}$, verbunden ist, die den Widerstand der Luftzwischenräume repräsentiren. Wenn

R_F der Widerstand der Batterie und des Verbindungsdrahts ist und der Apparat gut isolirt wird, so ist die Stromstärke in dem Drahte, welcher dem Anker entspricht,

$$J = \frac{E}{R_F + R_a + R_\alpha}.$$

Dies sind jedoch nicht die Bedingungen für den entsprechenden magnetischen Kreis, denn hier gehen die Kraftlinien nicht nur durch die Eisentheile, sondern auch zum Theil durch die Luft. Um diese Bedingungen genau darzustellen, müssen wir uns denken, dass unser elektrischer Apparat sich in einem schlechtleitenden Medium befindet. Es fliesst alsdann der Strom theilweise durch dieses Medium, und nicht ausschliesslich durch den Widerstand R_A .

Es lässt sich unmöglich sagen, in welcher Weise die Streuung dieser Stromlinien stattfindet, aber es ist klar, dass der grösste Verlust zwischen den Polen eintritt, wo die Potentialdifferenz ein Maximum ist, und dass in einem bestimmten Medium und bei einer bestimmten Anordnung der Batterie der ganze Verlust, welcher in Folge der Streuung stattfindet, annähernd der Potentialdifferenz der Pole proportional ist. Wenn diese gleich X_1 ist, so ist der gesammte Stromverlust

$$\zeta = \frac{X_1}{\rho},$$

indem wir mit ρ den mittleren Widerstand des umgebenden Mediums für diese specielle Anordnung der Batterie bezeichnen. Mit hinreichender Annäherung ist also der Strom in der Batterie:

$$z_2 = z_1 + \zeta.$$

Wir denken uns nun, das wir auf irgend eine Weise der elektromotorischen Kraft (X) der Batterie einen Werth zwischen Null und derjenigen Grösse beilegen können, welcher den geforderten maximalen Strom (z_1) hervorruft. Es lässt sich alsdann bestimmen, welche elektromotorische Kraft für jeden Werth von z_1 , der zwischen Null und dem Maximum liegt, erforderlich ist. Wir verfahren zu diesem Zwecke folgendermassen: Wir bestimmen zuerst die Potentialdifferenz an den Polen

$$X_1 = (R_\alpha + R_A) z_1,$$

darauf den Verlust durch Streuung

$$\zeta = \frac{X_1}{\rho},$$

alsdann die gesammte Strommenge

$$z_2 = z_1 + \zeta,$$

ferner den Verlust an elektromotorischer Kraft X_2 , welche durch den inneren Widerstand der Batterie bewirkt wird,

$$X_2 = R_F z_2,$$

und zuletzt die gesammte elektromotorische Kraft

$$X = X_1 + X_2.$$

Der Hufeisenmagnet ist der eingetauchten Batterie analog, da er von einem Medium umgeben ist, welches den Durchgang von magnetischen Kraftlinien gestattet. Der elektromotorischen Kraft der Batterie entspricht die totale erregende Kraft, welche auf den Magneten wirkt, während den Strömen z_2 , z_1 und ζ die Kraftlinienströme entsprechen, welche bezw. durch den Magnetkern, den Anker und die umgebende Luft fließen.

Da für geringe Magnetisierungsgrade die Widerstände des Ankers und des Magneten nicht sehr verschieden von ihren niedrigsten Anfangswerthen, also im Vergleich zu dem Widerstand der Luft sehr klein sind, so folgt, dass für niedrige Magnetisierungsgrade die Streuung nur einen geringen Einfluss auf die erregende Kraft hat oder mit anderen Worten dass die Streuung die Energie nicht beträchtlich vergrößert, welche für die Erzeugung des nützlichen Feldes aufgewendet werden muss. Für stärkere Magnetisierungen, wie man sie im gewöhnlichen Betriebe bei Dynamomaschinen und Motoren findet, verhält sich die Sache jedoch anders. Der Widerstand des Ankers ist hier bedeutend grösser, und damit in noch höherem Masse X_1 , d. h. jener Theil der erregenden Kraft (oder der magnetischen Spannung an den Polen der Feldmagnete), welcher nothwendig ist, um die Kraftlinien durch den Luftraum und den Anker zu treiben. Es folgt hieraus unmittelbar, dass die Stärke des nicht nutzbaren Theils des Magnetfeldes bedeutend zunimmt; mithin ist auch die Dichte der Kraftlinien in dem Magnetkern viel grösser, als sonst dem nutzbaren Felde entspräche. Hierdurch wächst wieder der magnetische Widerstand, und folglich auch die erregende Kraft.

Die Bestimmung der erregenden Kraft für eine bestimmte Anzahl nutzbarer Kraftlinien im Anker würde nun möglich sein, wenn wir erstens den Widerstand der Streuung kennen würden und zweitens die Beziehung zwischen der Induktion (Anzahl der Kraftlinien auf

1 qcm.) und dem magnetischen Widerstand für die besondere Eisensorte, welche bei der Maschine gebraucht wird. Diese Beziehung kann experimentell an Probestücken bestimmt, und die Streuung nach der Zeichnung annähernd berechnet werden. Die letztere Aufgabe ist jedoch etwas unbestimmt, weil bei den complicirten Formen der Dynamomaschinen sich der Weg, welchen die zerstreuten Kraftlinien einschlagen, nicht leicht angeben lässt; es muss in vieler Hinsicht hier manches sozusagen dem Gefühl des Konstrukteurs überlassen bleiben. Die experimentelle Bestimmung der magnetischen Eigenschaften des benutzten Eisens erfordert andererseits so viel Aufwand an physikalischen Untersuchungen, dass nur sehr wenige Maschinenfabrikanten solche für jede Maschine unternehmen können, die sie bauen wollen. Der Verfasser hat deshalb eine angenäherte Methode angenommen, welche zwar nicht eine grosse wissenschaftliche Genauigkeit bezweckt, aber dennoch mit den Resultaten der wirklichen Praxis in ziemlich guter Uebereinstimmung steht. Bei dieser Methode wird die Annahme gemacht, dass der Widerstand der Streuung den linearen Dimensionen der Maschine umgekehrt proportional ist und dass der magnetische Widerstand des Eisens eine Funktion des Sättigungs-Koefficienten ist. Es möge z_1 die Anzahl der Kraftlinien sein, welche wirklich durch den Anker gehen, und Z_1 die maximale Anzahl der Kraftlinien, welche im gesättigten Anker bei unendlich grosser erregender Kraft auftreten kann, so ist $\frac{z_1}{Z_1} = \sigma_1$ der Sättigungs-Koefficient. Der magnetische Widerstand würde alsdann bei einer Induktion z_1 durch das Produkt des anfänglichen Widerstandes $\left(\frac{1}{a b} \text{ in (25) auf S. 92}\right)$ und des Ausdrucks

$$\frac{\operatorname{tang}\left(\frac{\pi}{2} \sigma_1\right)}{\frac{\pi}{2} \sigma_1}$$

gegeben sein, welcher den Namen der Tangentenfunktion erhalten hat. Wenn wir annehmen, dass diese Funktion genau die Zunahme des magnetischen Widerstandes darstellt, welche der Zunahme der Induktion entspricht, so haben wir alle Daten, welche für die Vorherbestimmung der Charakteristik der Magnetisirung nöthig sind. Aus zahlreichen Versuchen, welche der Verfasser an seinen eignen

Maschinen angestellt hat, folgt, dass das Eisen, welches jetzt für die Dynamomaschinen und Motoren seiner Konstruktion verwandt wird, von sehr guter Beschaffenheit ist: die Sättigung der Ankerkerne tritt ein, wenn die Dichte der Kraftlinien auf 24000 C. G. S. Einheiten gestiegen ist; bei den Magnetkernen, wenn sie 16700 C. G. S. Einheiten erreicht hat. Die folgende Tabelle ist nach diesen Annahmen berechnet worden:

Kraftlinien (C. G. S. Einheit) auf 1 qcm	Tangentenfunktionen		Kraftlinien (C. G. S. Einheit) auf 1 qcm	Tangentenfunktionen	
	für den Anker	für die Feld- magnete		für den Anker	für die Feld- magnete
1000	1,00	1,01	13000	1,30	2,22
2000	1,00	1,01	14000	1,36	2,37
3000	1,01	1,02	15000	1,46	4,35
4000	1,02	1,05	16000	1,62	9,55
5000	1,03	1,08	17000	1,82	∞
6000	1,05	1,12	18000	2,03	
7000	1,07	1,17	19000	2,35	
8000	1,10	1,24	20000	2,78	
9000	1,13	1,32	21000	3,52	
10000	1,16	1,45	22000	4,96	
11000	1,20	1,62	23000	9,00	
12000	1,24	1,86	24000	∞	

Um die erregende Kraft zu bestimmen, welche eine bestimmte Anzahl von Kraftlinien in dem Anker einer gegebenen Dynamomaschine erzeugt, verfahren wir folgendermassen: Wir bestimmen aus der Zeichnung den Querschnitt des Ankereisens ab und den der Magnete AB . Bei der Sättigung ist die Induktion 24000 ab , bzw. 16700 AB in C. G. S. Einheiten. Wir nehmen nun eine zweckmässige Induktion z_1 an und bestimmen die entsprechende Dichte $\frac{z_1}{a b}$. Der entsprechende Werth der Tangentenfunktion wird alsdann aus der Tafel entnommen und mit dem Anfangswiderstand des Ankerkerns $\frac{1}{a b}$ multiplicirt. Hierzu addiren wir den Widerstand des Luftzwischenraums an den Polen $\left(567 \frac{2 \delta}{\lambda b}\right)$ und multipliciren die Summe mit z_1 . Dies giebt den Theil der erregenden Kraft (X_1), welcher erforderlich ist, um die Anzahl der nützlichen Kraftlinien z_1 durch den Ankerkern und Luftzwischenraum zu treiben.

Die entsprechende magnetische Spannung erzeugt eine gewisse Streuung, welche durch die Gleichung

$$\zeta = \frac{X_1}{\varrho}$$

dargestellt wird. Aus zahlreichen Versuchen hat der Verfasser gefunden, dass bei Maschinen mit einfachem aufrecht stehenden Hufeisenmagneten von der in Fig. 40 abgebildeten Form der Widerstand der Streuung durch die Formel

$$\varrho = \frac{680}{\sqrt{ld}}$$

angegeben wird, während für die Maschinen von umgekehrter Form (Fig. 39), wo die Pole der eisernen Grundplatte näher sind, der Widerstand der Streuung etwas kleiner ist und durch die Formel

$$\varrho = \frac{460}{\sqrt{ld}}$$

dargestellt werden kann. Die Anzahl der Kraftlinien im ganzen Felde ist annähernd gleich der Summe der für die Induktion nutzbaren und verlorenen Kraftlinien:

$$z_2 = z_1 + \zeta.$$

Wir bestimmen nun die Dichte der Kraftlinien in den Feldmagneten, berechnen also $\frac{z_2}{AB}$ und finden den entsprechenden Multiplikator in der Tabelle. Der Anfangswiderstand der Feldmagnete $\frac{2L}{AB}$ muss mit dieser Zahl multiplicirt werden, um den wirklichen Widerstand zu geben, welcher der Induktion in jedem einzelnen Falle entspricht. Das Produkt multiplicirt mit z_2 giebt X_2 , jenen Theil der gesammten erregenden Kraft, welche nöthig ist, um z_2 Kraftlinien durch die Feldmagnete zu treiben. Die gesammte erregende Kraft ist

$$X = X_1 + X_2.$$

Wird dieselbe Rechnung für eine Reihe von Werthen der Grösse z_1 angestellt und werden die Resultate graphisch aufgetragen, so erhält man die Charakteristik der Hauptstromdynamomaschine.

Beispielsweise ist hier die Rechnung für eine Maschine mit einfachem aufrecht stehenden Hufeisenmagnet angestellt, die folgende Dimensionen hat:

Ankerkern: Durchmesser = 33,0 cm, Länge = 35,6 cm und radiale Tiefe = 6,3 cm.

Feldmagnet: Durchmesser der Bohrung = 35,6 cm und Querschnitt = $17,8 \times 33,0$ qcm.

$$\rho = 50,3; R_\alpha = 6,27, R_A = 0,54, R_F = 1,33.$$

Die Dichte der Kraftlinien im Anker und in den Feldmagneten (in C. G. S. Einheiten) ist mit m , bzw. M bezeichnet, K_1 und K_2 sind die entsprechenden Werthe der Tangentenfunktion für Anker und Feldmagnete.

$z_1 \times 10^{-3}$	$\zeta \times 10^{-3}$	$z_2 \times 10^{-3}$	$\frac{m}{M}$	$\frac{K_1}{K_2}$	$\frac{R_A \times K_1}{R_F \times K_2}$	$R_{(A + \alpha)}$	$\frac{x_1}{x_2}$	x
372	—	—	6700	1,04	0,56	6,83	2732	—
—	50	422	4600	1,07	1,42	—	644	3376
510	—	—	9300	1,14	0,61	6,88	3784	—
—	70	580	6300	1,13	1,50	—	936	4720
766	—	—	14000	1,40	0,75	7,02	5800	—
—	107	873	9580	1,39	1,84	—	1730	7530
930	—	—	16900	1,80	0,97	7,24	7240	—
—	132	1062	11600	1,75	2,32	—	2644	9884
1020	—	—	18600	2,18	1,18	7,45	8195	—
—	151	1171	12900	2,20	2,92	—	3700	11900
1070	—	—	19500	2,52	1,36	7,63	8812	—
—	163	1233	13600	2,54	3,37	—	4483	13295
1120	—	—	20400	3,05	1,65	7,92	9600	—
—	176	1296	14300	3,20	4,25	—	5950	15550
1170	—	—	21400	3,92	2,11	8,38	10600	—
—	186	1356	15000	4,20	5,88	—	8614	19214
1210	—	—	21900	4,30	2,32	8,59	11167	—
—	204	1414	15500	6,00	7,98	—	12130	23297
1220	—	—	22100	4,90	2,75	9,02	11816	—
—	206	1426	15600	6,60	8,80	—	13480	25296
1230	—	—	22300	5,61	3,03	9,30	12270	—
—	228	1458	16000	10,0	13,3	—	20814	33084

Um den Einfluss der Streuung zu zeigen, ist die Rechnung auch für eine Maschine von denselben Dimensionen, aber von umgekehrter Form durchgeführt. In diesem Fall ist $\rho = 34$; alle anderen Daten für die Konstruktion bleiben ungeändert. Fig. 55 stellt die Charakteristiken dieser beiden Maschinen dar, welche nach den so erhaltenen Zahlen gezeichnet sind. Als Abscissen sind die Ampèrewindungen X , als Ordinaten die Anzahl z_1 der nützlichen Kraftlinien (in C. G. S. Einheiten) aufgetragen.

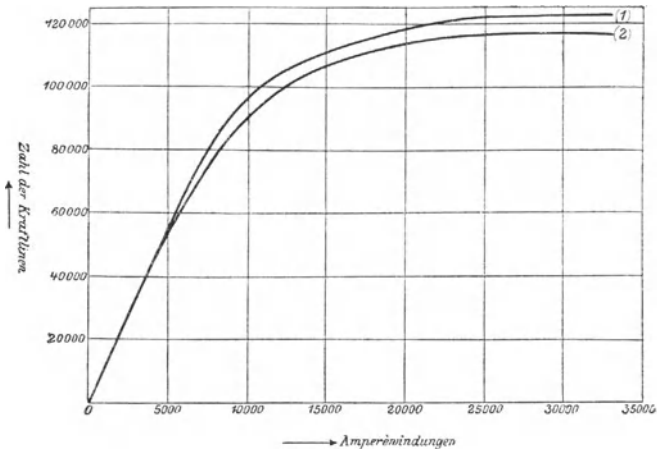


Fig. 55.

$z_1 \times 10^{-3}$	$\zeta \times 10^{-3}$	$z_2 \times 10^{-3}$	m M	$\frac{K_1}{K_2}$	$\frac{R_A \times K_1}{R_F \times K_2}$	$R(A + \alpha)$	$\frac{X_1}{X_2}$	x
372	—	—	6700	1,04	0,56	6,83	2732	—
—	75	447	4900	1,07	1,43	—	686	3418
510	—	—	9300	1,14	0,61	6,88	3784	—
—	103	613	6800	1,16	1,54	—	1020	4804
766	—	—	14000	1,40	0,75	7,02	5800	—
—	159	925	10100	1,48	1,97	—	1960	7760
930	—	—	16900	1,80	0,97	7,24	7240	—
—	197	1127	12400	2,00	2,66	—	3220	10460
1020	—	—	18600	2,18	1,18	7,45	8195	—
—	224	1244	13700	2,70	3,60	—	4827	13022
1070	—	—	19500	2,52	1,36	7,63	8812	—
—	242	1312	14400	3,34	4,44	—	6282	15094
1120	—	—	20400	3,05	1,65	7,92	9600	—
—	262	1382	15300	4,90	6,50	—	9700	19300
1160	—	—	21000	3,50	1,90	8,17	10150	—
—	278	1438	15700	7,00	9,31	—	14400	24550
1170	—	—	21300	3,80	2,05	8,32	10480	—
—	286	1456	16000	10,00	13,30	—	20860	31340

Die charakteristischen Kurven der Magnetisierung geben, wie wir schon ausführten, die gesammte Zahl der Kraftlinien im Anker,

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, nicht genau diejenige, welche im Anker erzeugt wird, sondern entweder kleiner oder grösser, 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 äusseren Stromkreis öffnet; aber wir können uns auch denken, dass der äussere Stromkreis geschlossen bleibt und dass eine elektromotorische Kraft in den Kreis eingeschaltet wird, welche der im Anker entstehenden elektromotorischen Kraft entgegen wirkt und welche genau so gross ist, dass in keiner Richtung ein Strom entsteht. Es findet alsdann gleichsam statisches Gleichgewicht zwischen der elektromotorischen Kraft des Ankers und der ihr entgegengesetzten statt. Aus diesem Grunde hat der Verfasser den Namen „statische Charakteristik“ für jede charakteristische Kurve vorgeschlagen, welche diesen Fall darstellt. Wenn wir uns nun denken, dass die entgegengesetzte elektromotorische Kraft vermindert wird, so wird sie der elektromotorischen Kraft des Ankers nicht mehr das Gleichgewicht halten, es wird also ein Strom entstehen, welcher Arbeit leisten kann. Die Maschine arbeitet alsdann als Generator, welcher mechanische Energie aufnimmt und elektrische ausgiebt. Eine charakteristische Kurve, welche diese Betriebsart darstellt, nennen wir „Dynamo-Charakteristik“. Wenn wir andererseits die entgegengesetzte elektromotorische Kraft so weit vergrössern, dass sie der elektromotorischen Kraft des Ankers überlegen ist, so geht ein Strom durch den Anker, welcher die elektromotorische Kraft desselben überwindet, also die Maschine als Motor treibt. Eine Charakteristik, welche dieser Betriebsart der Maschine entspricht, nennen wir „Motor-Charakteristik“. Aus gewissen Gründen, die wir sogleich anführen werden, muss die Dynamo-Charakteristik immer kleiner als die statische sein, und dasselbe gilt im allgemeinen für die Motor-Charakteristik; aber hier giebt es auch Fälle, wo die Motorkurve über der statischen Kurve liegt. Wenn wir uns gegenwärtig nur auf die Dynamomaschinen beschränken, so

ist leicht zu sehen, warum die Dynamo-Kurve unter der statischen liegt. Zuerst muss der Verlust an elektromotorischer Kraft berücksichtigt werden, welcher 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 folgendermassen erklärt werden kann. Wir wollen zu diesem Zweck für den Augenblick annehmen, dass wir es mit einer zweipoligen Dynamomaschine zu thun haben, deren Bürsten genau rechtwinklig zu dem polaren Durchmesser stehen, und wir wollen unsere Aufmerksamkeit z. B. 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 anderen 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, wird 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. Derselbe 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 in der Spule im Moment, wo sie die Bürste passirt, schon derselbe Strom 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 Verschieben der Bürste haben wir den Funken vermieden, aber auch einige Kraftlinien aufge-

opfert, welche sonst die elektromotorische Kraft des Ankers vergrößert hätten und welche, während die Maschine bei offenem Stromkreis arbeitete, in der That ausgenutzt sind.

Es kommen also mehr Kraftlinien zur Geltung, wenn die Maschine statisch arbeitet, als wenn sie dynamisch wirkt, 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 magnetisiert 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 Feldmag-

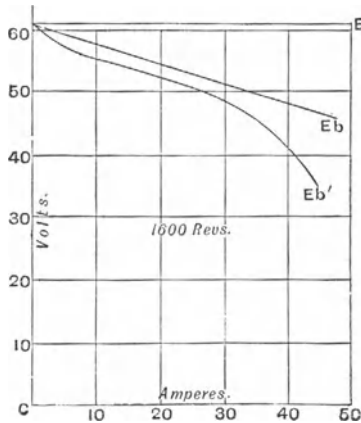


Fig. 56.

nete entstehen und würden diese weder verstärken, noch schwächen. Aber die Bürsten müssen aus dem schon angegebenen Grunde nach vorwärts gerückt werden, und in Folge dessen kommen der Anker und die Feldmagnete mit gleichen Polen näher zusammen; das Resultat ist, dass das Hauptfeld etwas geschwächt wird und damit auch die elektromotorische Kraft. In Wirklichkeit ist die Erscheinung, welche wir hier nur kurz andeuten und welche man in der Technik „Rückwirkung des Ankers“ nennt, nicht so einfach, aber es würde über den Rahmen des gegenwärtigen Werkes hinausgehen, genauer darauf einzugehen. Zudem ist die gesammte Rückwirkung des Ankers bei guten Dynamomaschinen sehr klein und oft geringer als 5% der ganzen elektromotorischen Kraft. Bei schlecht konstruir-

ten Maschinen kann sie grösser werden, wie man aus Fig. 56 sieht, welche die innere Charakteristik einer Grammeschen Dynamomaschine vom A-Typus nach der Untersuchung von Marcel Deprez darstellt.

Das Verhalten der Dynamomaschine lässt sich am besten bei solchen Maschinen untersuchen, welche besonders erregt werden. Esson hat sehr sorgfältige Versuche hierüber angestellt, welche in „The Electrical Review“, April 1884, veröffentlicht sind. Die untersuchte Maschine war eine vom Phoenix-Typus mit Pacinottischem Anker. Sie wurde besonders erregt und lief mit einer konstanten Geschwindigkeit von 1600 Touren in der Minute. Der Strom, welcher durch den Anker ging, wurde mittelst eines Rheostaten variiert. Die Linie E, Fig. 57, stellt die innere elektromotorische

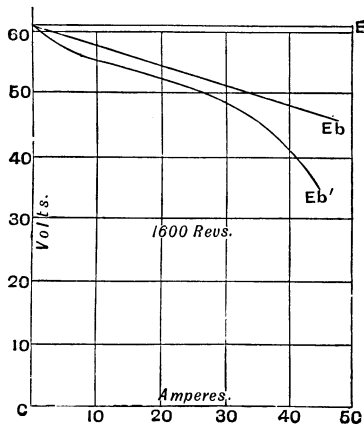


Fig. 57.

Kraft dar, welche der konstanten erregenden Kraft entspricht, wenn keine Rückwirkungen vorhanden wären. Die Linie E_b stellt die Klemmenspannung der Maschine dar, wenn keine Rückwirkung vorhanden wäre, und die Linie E_b' giebt die wirklich beobachteten Werthe. Der Unterschied der Ordinaten von E_b und E_b' entspricht dem Verlust an elektromotorischer Kraft, welcher von der Selbstinduktion und 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 inneren Widerstandes zu der inneren elektromotorischen Kraft des Ankers addirt, statt wie vorher von ihr subtrahirt werden.

Wenn die Maschine rationell konstruirt ist, so existirt nur ein geringer Unterschied zwischen der dynamischen und motorischen Charakteristik, welche beide unter der statischen liegen. Wenn die Maschine aber nicht für einen hohen Wirkungsgrad konstruirt ist, so kann es vorkommen, dass ihre Motorkurve 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 dieser letztere konstant ist, so folgt, dass, je höher die Klemmenspannung an den Bürsten, um so höher auch die elektromotorische Kraft des Motors ist. Der Verfasser hat diese Schlussfolgerungen durch Messungen an einer Bürginschen 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 in Folge der sechseckigen Form des Ankers die Entfernung zwischen diesen und der Oberfläche der Polschuhe andauernd wechselt. Hierdurch wird ein Energiebetrag absorbiert, welcher 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. Die Thatsache, dass einige Maschinen eine hohe elektromotorische Gegenkraft haben, hat gewisse Forscher, besonders Ayrton und Perry, dazu geführt, eine Theorie der Elektromotoren aufzustellen, nach welcher der Anker die Kraft besitzt, die Feldstärke zu vergrößern, anstatt sie zu schwächen, wie es wirklich der Fall ist, 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, welche für die besten Dynamomaschinen gelten.

Die Rückwirkung des Ankerstromes auf das magnetische Feld ist von den Gebrüdern Hopkinson, ferner von Esson und Swinburne untersucht worden, welche jedoch für ihre genügende Bestimmung keine einfachen Regeln angegeben haben. Einige Konstrukteure begnügen sich damit, einen gewissen Procentsatz für die störende Wirkung des Ankerstromes anzunehmen, welcher zwischen 4 und 8% der statischen

elektromotorischen Kraft für den Ring- und zwischen 2 und 4% für den Trommelanker schwankt. Soweit dem Verfasser bekannt ist, stammt der einzige Versuch, eine einfache Regel für die Bestimmung der Rückwirkung aufzustellen, von Hrn. von Dolivo-Dobrowolsky. Es möge in Fig. 58 OF die Ampèrewindungen auf den Feldmagneten darstellen, und OA_1 die Ampèrewindungen des Ankers. Bei einer zweipoligen Trommelmaschine, welche Nt äussere Leiter hat und durch welche ein Strom J_1 fliesst, würde die Länge der Linie OA_1 die Grösse $\frac{Nt}{2} \frac{J_1}{2}$ darstellen, beim Ringanker $Nt \frac{J_1}{2}$. Wenn wir nun das Rechteck OA_1B_1F zeichnen und die Diagonale OB_1

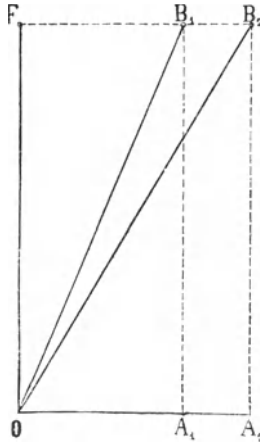


Fig. 58.

ziehen, so wird das Verhältniss zwischen der statischen und dynamischen elektromotorischen Kraft durch das Verhältniss von OB_1 zu OF gegeben. Wenn in ähnlicher Weise die Strecke OA_2 die Ampèrewindungen bei dem Ankerstrom J_2 darstellt, so giebt das Verhältniss von OB_2 und OF die abschwächende Wirkung, welche vom Ankerstrom auf das Feld ausgeübt wird. Mit Benutzung des Dobrowolskyschen Dreiecks kann man auf diese Weise vorherbestimmen, welche Felderregung bei verschiedenem Ankerstrom erforderlich ist. Der Erfinder dieser Methode hat konstatiert, dass der Fehler bei einer solchen Vorausberechnung der dynamischen oder motorischen Charakteristik aus der statischen 1% nicht

überschreitet und im Allgemeinen bis auf $\frac{1}{2}\%$ mit den Werthen übereinstimmt, welche nachher durch den Versuch gefunden werden. Dies bezieht sich auf Maschinen von dem besonderen Typus, welche von ihm konstruirt werden. Ein wichtiges Merkmal dieser Maschinen ist es, dass eine cylindrische Polbuchse den Anker umgiebt und die Pole der Feldmagnete mit einander verbindet. Es ist also keine Lücke zwischen zwei aufeinander folgenden Polen, sondern überall Eisen. Durch diese Anordnung erreicht Dobrowolsky, dass die Kraftlinien des Feldes sehr allmählich abnehmen und dass keine Funken am Kollektor entstehen; die Rückwirkung des Ankers wird jedoch dadurch vergrößert, da das benachbarte Eisen die Selbstinduktion der kommutirten Spulen vermehrt. Bei Maschinen, welche keine Polbuchse haben, ist die Rückwirkung natürlich kleiner, und der Verfasser hat gefunden, dass in diesen Fällen das Dobrowolskysche Dreieck die dynamische Charakteristik etwas zu klein giebt. Der Fehler wird vermieden, wenn man nur 0,5 bis 0,7 der Ampèrewindungen des Ankers der graphischen Konstruktion zu Grunde legt.

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

Fig. 59 zeigt die innere und äussere Charakteristik von einer Siemens'schen Hauptstrommaschine, welche von Hopkinson in den „Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers“ 1879 mitgetheilt wird. Die punktirte Kurve OE_b stellt die Klemmenspannung der Maschine dar und die ausgezogene Linie OE_a die elektromotorische Kraft des Ankers. Die letztere erhält man aus der ersteren, indem man zu ihren Ordinaten den inneren Verlust an elektromotorischer Kraft addirt. Dieser ist gleich dem Produkt aus Stromstärke und innerem Widerstand, welcher bei der Maschine gleich 0,6 Ohm war. Deshalb ist der Verlust bei der Stromstärke von 50 Ampère gleich 30 Volt, 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, welchen diese Linie mit der Abscissenachse einschliesst, ist offenbar gleich dem inneren Widerstand der Maschine. Die Ordinaten zwischen Or und OE_a stellen die äussere elektromotorische Kraft dar, und folglich wird die

innere Charakteristik $O E_a$ die äussere, wenn wir $O r$ statt der horizontalen Achse als Grundlinie annehmen.

Nach einer anschaulichen Methode, welche von Silvanus P. Thompson herrührt, können diese Charakteristiken auch dazu verwandt werden, um zu zeigen, 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 dar-

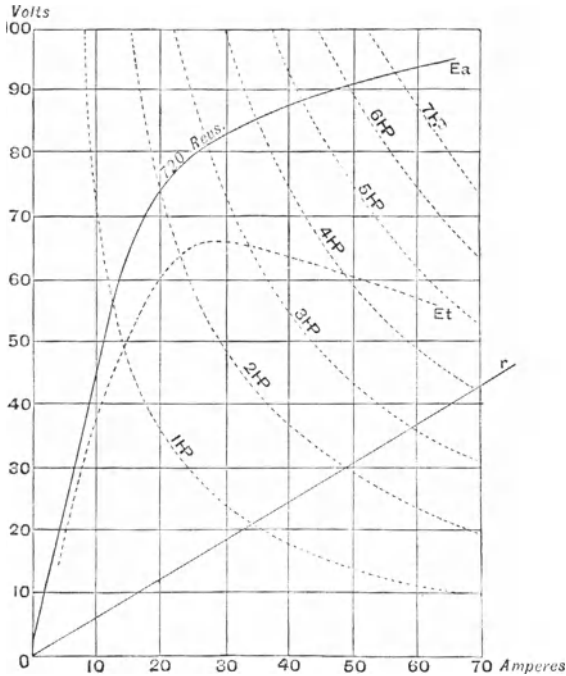


Fig. 59.

stellt, gleich $\frac{i E_a}{736}$. Eine 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. 59) einzeichnen, so können wir auf einen Blick sehen, wieviel Pferdestärken jedem Punkt der Charakteristik entsprechen. So stellt ein Strom von 30 Ampère ungefähr 3,35 P.S. an innerer elektrischer Energie dar und ungefähr 2,7 P.S. an äusserer Energie. Ein Strom von 50 Ampère stellt etwas über 6 P.S. innerer und etwas mehr als 4 P.S. äusserer Energie dar u. s. w.

Bei einer Dynamomaschine liegt die innere Charakteristik immer über der äusseren. Bei einem Motor ist jedoch ihre gegenseitige Stellung umgekehrt, da die äussere elektromotorische Kraft nothwendig grösser ist als die elektromotorische Gegenkraft der Ankerspulen. Fig. 60 zeigt die charakteristischen Kurven einer Siemenschen Dynamomaschine, welche wir oben als Motor behandelten. Um das Diagramm nicht zu weit auszudehnen, ist die Geschwindigkeit auf 500 Touren ermässigt. Die Kurve OE_a stellt die elektromotorische Gegenkraft dar, welche in der Ankerwicklung entsteht, und die punktirte Kurve OE_t bedeutet die Klemmenspannung. Der Unterschied der Ordinaten beider Kurven stellt die elektromotorische Kraft dar, welche nöthig ist, um den inneren Widerstand der Maschine zu überwinden. Wenn wir die Gerade Or unter einen solchen Winkel ziehen, dass die Tangente desselben dem inneren 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 äusseren Charakteristik OE_a gerechnet werden.

In dem Diagramm (Fig. 60) ist angenommen, dass wir auf irgend eine Weise die Geschwindigkeit auf 500 Touren 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, welche bis zu einer gewissen Grenze von einander unabhängig sind. Die Geschwindigkeit hängt von der Stromstärke und der elektromotorischen Kraft der Stromquelle ab, und von dem Betrage der mechanischen Arbeit, welche zu leisten ist. In einigen Fällen hängt die Arbeit, d. h. das Produkt von Drehungsmoment und Geschwindigkeit, selbst wieder von der letzteren ab; man sieht, dass die Beziehung zwischen

diesen verschiedenen Grössen von ziemlich complicirter Natur ist. Es ist jedoch leicht, diese Beziehungen graphisch darzustellen mittelst der Geschwindigkeitscharakteristik, welche zuerst vom Verfasser in „The Electrician“, 29. December 1883, veröffentlicht ist. Wir setzen den Fall, dass die äussere elektromotorische Kraft einen

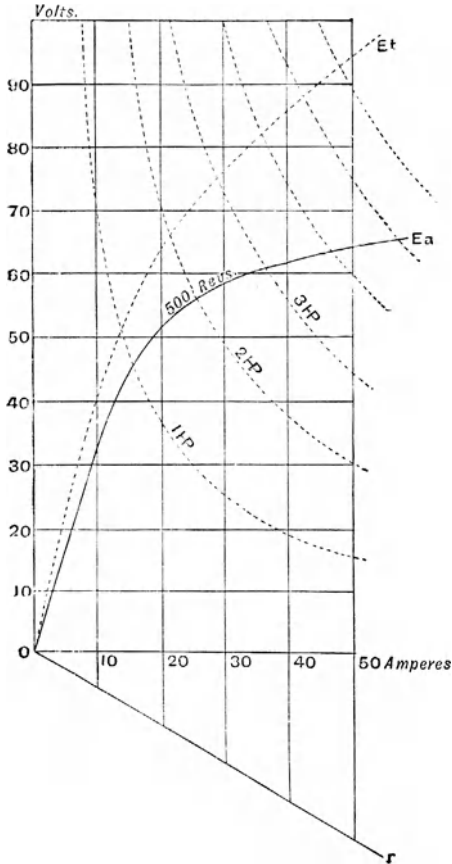


Fig. 60.

bestimmten und konstanten Werth hat. Wie wird die Beziehung zwischen Geschwindigkeit, Kraft und Wirkungsgrad beispielsweise bei einem Hauptstrommotor sein? Da E_t für alle Stromstärken konstant ist, so haben wir praktisch eine unerschöpfliche Stromquelle, wie sie die Kabel einer Centrale darstellen. Der Strom,

welcher durch den Motor geht, hängt von dessen Widerstande und dessen 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 weniger Kraft absorbiert er. Es mögen in Fig. 61 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 Figur 61 gezeichnete. Der leichtere Weg, die Kurve experimentell zu bestimmen, ist derjenige, dass man an dem Motor einen Bremszaum anbringt und diesen mit verschiedenen Gewichten belastet, so dass man verschiedene Geschwindigkeiten erhält. Die von dem Zaum absorbierten Pferdestärken sind die Or-

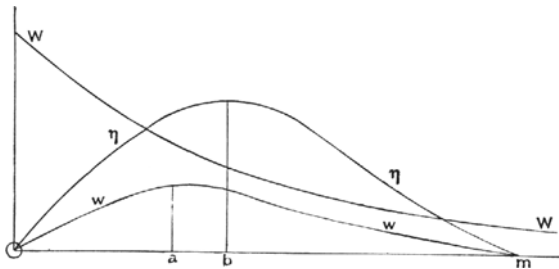


Fig. 61.

dinaten der Kurve w . Wenn wir mit einer so grossen Belastung des Zaums beginnen, dass der Motor stillsteht, so wird das Maximum an elektrischer Energie absorbiert, ohne dass äussere Arbeit geleistet wird. Entlasten wir andererseits 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 absorbierte 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 diese Arbeit ein Maximum ist. Das Verhältniss der Ordinaten von W und w kann in einer Kurve $\eta\eta$ dargestellt werden, welche in beliebigem Massstab gezeichnet, den Wirkungsgrad des Motors als eine Funktion der Geschwindigkeit angiebt. Für eine spezielle Geschwindigkeit ob ist dieser Wirkungsgrad ein Maxi-

mum, aber dieses braucht nicht nothwendig dieselbe Geschwindigkeit zu sein, für welche die Arbeit ein Maximum ist. In der Regel ist sie bedeutend grösser, und in wirklichem Betriebe sollte der Motor so regulirt sein, dass er annähernd mit der Geschwindigkeit läuft, für welche der Wirkungsgrad ein Maximum ist.

Die experimentelle Bestimmung dieser Geschwindigkeit erfordert, wie wir oben erwähnten, ein Dynamometer und lässt sich in dem Fall nicht anwenden, wo ein solcher Apparat nicht vorhanden ist. Alsdann kann man aber eine andere Methode benutzen, welche ziemlich zuverlässig ist, obwohl nicht so genau, wie die vorhergehende.

Die zu lösende Aufgabe besteht darin, die Beziehung zwischen Geschwindigkeit und Stromstärke bei einem gegebenen Hauptstrommotor zu finden, wenn dieser mit Strom von einer Quelle konstanter elektromotorischer Kraft aus versehen wird. Diese Aufgabe kann gelöst werden, wenn wir den inneren Widerstand und die innere Charakteristik des Motors kennen. Wenn wir die Beziehung zwischen Geschwindigkeit und Stromstärke erhalten haben, so können wir das Diagramm der Fig. 61 konstruiren, indem 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 Volt herrscht. Es möge in Fig. 62 OE_a die innere Charakteristik für eine konstante Geschwindigkeit, z. B. von 500 Touren, sein und es möge die Gerade r einen solchen Winkel mit der horizontalen Achse einschliessen, dass dessen trigonometrische Tangente gleich dem inneren Widerstand des Motors in Ohm ist, alsdann stellen die Ordinaten der Linie r die elektromotorischen Gegenkräfte dar, welche in der Wicklung des Ankers herrschen müssen, damit ein gegebener Strom hindurch fliesst. So ist z. B. für 100 Ampère die elektromotorische Gegenkraft gleich 40 Volt. Wenn der Anker 500 Touren in der Minute macht, so sehen wir aus der Charakteristik, dass seine elektromotorische Gegenkraft gleich 68 Volt ist, und um sie auf 40 Volt herabzusetzen, so dass ein Strom von 100 Ampère hindurchgeht, muss die Geschwindigkeit im Verhältniss von 68 zu 40 verkleinert werden. Die Geschwindigkeit, welche einem Strom von 100 Ampère entspricht, ist deshalb gleich $500 \frac{40}{68} = 294$ Umdrehungen.

Ähnliche Berechnungen können für andere Werthe der Stromstärke

angestellt werden, und die erhaltenen Geschwindigkeiten werden, wie Fig. 62 zeigt, in einer Kurve aufgetragen, welche unterhalb der horizontalen Achse verläuft. Bei 166 Ampère ist die Geschwindigkeit Null, weil die gesammte elektromotorische Kraft von 100 Volt erforderlich ist, um den inneren Widerstand des Motors zu überwinden und nichts für die Ueberwindung einer elektromotorischen Gegenkraft übrig bleibt. Bei 16 Ampère beträgt die Geschwindigkeit 1000 Umdrehungen, und für kleinere Stromstärken ist die Ge-

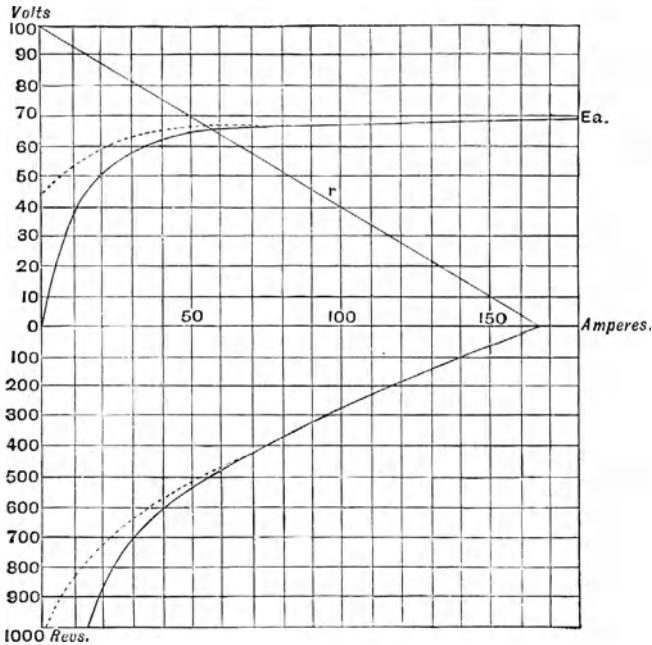


Fig. 62.

schwindigkeit noch grösser. Theoretisch betrachtet, sollte sie unendlich gross sein, wenn kein Strom hindurchfliesst. Dies würde der Fall sein, wenn der Motor gar keine Arbeit leistete und es keine inneren mechanischen Verluste gäbe. Diese Bedingung ist 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 ist sie verhältnissmässig nur klein, und folglich die Ge-

schwindigkeit des Motors beim Leerlauf ausserordentlich hoch. Dies ist in vielen Fällen ein Nachtheil, besonders wenn die Motoren Drehbänke und andere Maschinen treiben sollen, welche einen variablen Widerstand besitzen. Das Beispiel, welches in Fig. 62 dargestellt ist, findet auch Anwendung auf den Fall, wo ein Hauptstrommotor von einer Akkumulatoren-Batterie gespeist wird, welche einen sehr geringen inneren Widerstand hat, so dass die elektromotorische Kraft alsdann annähernd für alle Stromstärken konstant ist. Um den Unterschied in der Geschwindigkeit zu verringern, verwendet man gewöhnlich einen Rheostat oder variablen Widerstand, welcher 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 ist dies aber immer ein unzweckmässiger Apparat, welcher der persönlichen Wartung bedarf und auch nicht sehr wirksam ist, weil damit Aenderungen in der Geschwindigkeit doch nie ganz zu vermeiden sind. Er ist auch nicht sparsam, da durch die im Widerstand erzeugte Wärme Energie verloren geht. Besser ist es, die Feldmagnete mit Kompoundwicklung zu versehen, bei welcher der Haupt- und Nebenschlussstrom die Feldmagnete in derselben Richtung magnetisirt. Hierdurch wird der erste Theil der Charakteristik gehoben und die Geschwindigkeit vermindert, wie die punktirten Linien in Fig. 62 angeben. Diese Methode ist freilich kein vollständiges Heilmittel für das Uebel, sie ist aber eine Linderung, welche in der Praxis 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. Wenn ein Motor für eine Strassenbahn verwendet wird, so ist es sehr wichtig, dass er im Anfang beim Anziehen eine grosse Kraft besitzt. Diese Bedingung wird in bewundernswerther 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 hat auf diese Weise eine Selbstregulirung zwischen Geschwindigkeit, Kraft 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. Fällt die Bahn und ist folglich keine Zugkraft nöthig, so würde der Motor und mithin auch der Wagen eine zu grosse Geschwindigkeit erreichen, wenn er nicht auf irgend eine Weise gebremst wird. Dies war eine der Schwierigkeiten bei den früheren Formen des Reckenzaunschen Motors, welcher von Akkumulatoren betrieben wurde. Jeder Wagen hatte hier zwei Hauptstrommotoren, welche mittelst eines Zahnrades und einer Schraube ohne Ende direkt auf die Achsen des Wagens wirkten. Auf guter ebener Bahn und bei Abwärtsfahren von Steigungen musste man fortwährend die Bremse handhaben, um eine zu grosse Schnelligkeit der Motoren zu verhüten. Dieser Mangel ist bei den späteren Formen der elektrischen Strassenbahnwagen beseitigt; die Motoren haben gemischte Wicklung auf dem Anker, und in Folge dessen ist eine gewisse anfängliche Feldstärke beibehalten, während eine, die zulässige Grenze überschreitende Geschwindigkeit, vermieden ist.

Kapitel V.

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

Die Lösung der Aufgaben, welche sich auf die elektrische Kraftübertragung beziehen, werden durch den Gebrauch der Kurven sehr vereinfacht, welche wir im vorhergehenden Kapitel erklärten. Hierzu kommen noch andere graphische Methoden, von denen wir diejenigen erwähnen wollen, welche von Silvanus Thompson herrühren. Die gestellte Aufgabe lautet folgendermassen: Es möge in Fig. 63 das Quadrat ABCD so konstruiert sein, dass seine Seitenlänge die elektromotorische Kraft E der Quelle darstellt, aus welcher der Motor mit Strom versehen wird, und die elektromotorische Gegenkraft e werde durch die Strecke AF = AG dargestellt. Wir ziehen die Linien FK und GH, welche AB, bzw. 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 Arbeit, welche in mechanische Energie umgesetzt wird, gleich dem Produkt der elektromotorischen Gegenkraft e und der Stromstärke J ist. Es möge W den gesammten Widerstand des Stromkreises bedeuten, alsdann ist

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

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 Thompsonsche Diagramm kann sogleich dazu verwendet werden, um auf graphischem Wege zwei Aufgaben zu lösen, welche analytisch schon im ersten Kapitel (S. 32) behandelt sind. Es sind die folgenden: Welches ist die Bedingung dafür, dass die vom Motor abgegebene Energie ein Maximum ist? und sodann, welches ist die Bedingung für das Maximum des Wirkungsgrades?

Die Antwort auf die erste Frage ergibt sich leicht, wenn wir Fig. 63 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 bestimmen, welches Rechteck von allen, die zwischen diesen Linien

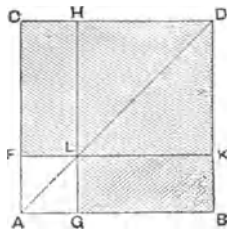


Fig. 63.

liegen können, das Maximum des Flächeninhalts hat. Es ist dies offenbar ein Quadrat, dessen Seiten halb so lang sind als die des äusseren 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

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

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

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

Was die zweite Aufgabe anbelangt, so ist leicht zu sehen, dass der Unterschied in dem Flächeninhalt der beiden Rechtecke, Fig. 63, um so grösser ist, je näher der Punkt L an A heranrückt, oder mit

anderen Worten, je kleiner die elektromotorische Gegenkraft ist. In demselben Masse 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 die elektromotorische Gegenkraft des Motors sich der elektromotorischen Kraft der Quelle nähert, woraus der Motor mit Strom versehen wird. 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 wirtschaftliche 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 äusseren Widerstand. Es ist jedoch gezeigt worden, dass bei konstantem Feld das Drehungsmoment des Motors allein vom Ankerstrom abhängt und von der Geschwindigkeit unabhängig ist. Wir können dies Gesetz als annähernd richtig auf den vorliegenden Fall anwenden und annehmen, dass der Strom, welcher erforderlich ist, um die innere Reibung zu überwinden, für jede Geschwindigkeit konstant ist. Es möge γ dies Minimum von Strom bedeuten, welches gerade dazu hinreicht, die Drehung des Motors zu unterhalten. Alsdann ist

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

der Strom, welcher Nutzarbeit leistet, und der wirtschaftliche Wirkungsgrad ist

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

oder

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

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

$$(E - e)^2 = EW\gamma. \quad \dots \dots \dots (29).$$

Diese Formel lässt sich graphisch darstellen. Es möge in Fig. 64 OA die Stromstärke bedeuten, bei welcher sich der Motor nahezu mit normaler Geschwindigkeit ohne äussere Arbeitsleistung dreht und OH die elektromotorische Kraft E der Elektrizitätsquelle, welche für alle Bedingungen konstant sein soll. Es würde dies praktisch der Fall sein, wenn die Stromquelle eine selbstregulierende Dynamomaschine oder eine Akkumulatorenbatterie von sehr geringem inneren Widerstande wäre. Der Flächeninhalt des Rechtecks OAGH stellt die Anzahl Watt dar, welche nöthig sind, damit der Motor mit normaler Geschwindigkeit läuft, wenn keine äussere Arbeit geleistet wird. Wenn der Motor Nebenschluss- oder gemischte Wicklung für konstante Geschwindigkeit hat, so ändert sich seine Feldstärke nicht erheblich, wenn äussere Arbeit geleistet wird, und der Flächeninhalt

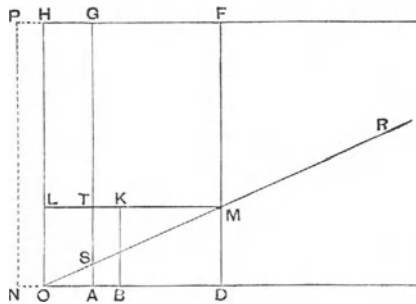


Fig. 64.

des Rechtecks OAGH stellt annähernd den inneren Energieverlust des Motors für alle Bedingungen dar. Wir ziehen nun die Gerade OR so, dass die trigonometrische Tangente des Winkels, den sie mit der horizontalen Achse einschliesst, gleich dem gesamten elektrischen Widerstand 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 dem Strom OD entspricht u. s. w. Wir verlängern ferner OD 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 $EW\gamma$ und nach Gl. (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 wirtschaftlichen Wirkungsgrad. Die an der Motorwelle verfügbare

Energie wird durch den Flächeninhalt des Rechtecks GFMT dargestellt; die von der Elektrizitätsquelle aufgewendete Energie ist gleich dem Flächeninhalt des Rechtecks ODFH, und das Verhältniss beider ist der wirtschaftliche Wirkungsgrad.

Im vorhergehenden Kapitel haben wir gezeigt, dass man mittelst eines Dynamometers die Geschwindigkeit für den wirtschaftlichen 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 kann dies an einem einfachen Beispiel aus der Praxis erklärt werden. Eine Dynamomaschine des Verfassers (mit Nebenschlusswicklung und für die Speisung von 60 Glühlampen bestimmt) wurde als Motor verwendet. Die elektromotorische Kraft der Quelle, welche eine Dynamomaschine mit gemischter Wicklung bildete, betrug 100 Volt; der Strom, welcher durch den leer laufenden Motor ging, betrug 4 Ampère, die Geschwindigkeit 1100 Touren in der Minute und der Widerstand der Leitung und des Ankers 0,2 Ohm. Wir haben also $W\gamma = 0,8$ und $\sqrt{E W\gamma} = \sqrt{80} = 8,94$.

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

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

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

Der Strom, welcher bei dieser Geschwindigkeit durch den Motor fließt, ist gleich 45 Ampère, wovon 4 Ampère nöthig sind, um die innere Reibung zu überwinden, und 41 Ampère für Nutzarbeit übrig bleiben. Wenn der Motor auf die Geschwindigkeit von 1010 Touren in der Minute regulirt wird, so erhalten wir demnach an der Welle

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

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 reduciren. Für den erwähnten Motor finden wir folgende Zahlen:

1010	Touren,	5,07	P.S.	e = 91;	i = 45;	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 ein Nebenschlussmotor sich 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 Ampère gebaut war und bei fortdauerndem Betriebe mit nicht mehr als 5 P.S. 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 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	Touren;	2,82	P.S.	e = 86;	i = 28;	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, 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 und wird selbst im Falle der Kraftübertragung auf bedeutende Entfernung erfüllt, wenn wir die Feldmagnete des Motors besonders erregen und auch durch ein Paar besonderer Kabel den Strom von den entfernten Elektrizitätsquellen herleiten. Aber in der Praxis würde eine solche Anordnung zu complicirt sein und zudem hätte sie, wie wir sogleich sehen werden, in Bezug auf die Konstanz der Geschwindigkeit keinen Vorthail 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 die elektromotorische Gegenkraft wieder der kleineren 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 kompensiren kann, die von der Abnahme der elektromotorischen Kraft herrührt. Deshalb kann ein reiner Nebenschluss-Motor, wenn er von einer Quelle konstanter elektromotorischer Kraft gespeist wird, sich nie selbst reguliren. Er muss schneller laufen, wenn die Belastung gering ist, und langsamer, wenn mehr Arbeit geleistet wird. Dasselbe ist in noch höherem Grade bei dem Hauptstrommotor der Fall. Der Nebenschluss-Motor ist hier immer noch vorzuziehen, wie wir aus obiger Tabelle (S. 125) sehen. Andererseits hat aber dieser 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 die Stellung so anordnen, dass das Feld erregt wird, bevor der Strom durch den Anker gehen kann, und um grosse Funken und Erwärmung des Ankers in den Fällen zu vermeiden, wo der belastete Motor still stehen soll, müssen Zusatzwiderstände in den Ankerkreis geschaltet werden, welche man herausnimmt, sobald der Motor eine gewisse Geschwindigkeit erreicht hat.

Wir wollen nun untersuchen, wie die elektromotorische Kraft der Quelle geändert werden muss, damit ein Nebenschluss-Motor unter wechselnder Belastung mit konstanter Geschwindigkeit läuft. Um die Aufgabe nicht allzusehr zu compliciren, nehmen wir an, dass die Feldmagnete des Motors bei normaler elektromotorischer Kraft bis zu solchem Grade 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 äusseren mechanischen Energie; und da e und γ beide konstant sind, so ändert sich mit der äusseren Energie oder mit der Belastung des Motors auch nothwendigerweise die Stromstärke i im Anker. Deshalb muss die elektromotorische Kraft E der Quelle steigen, wenn die Belastung wächst, und abnehmen, wenn die Belastung abnimmt. Es möge W der Widerstand der Leitung und des Ankers sein, so ist

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

$$E = e + iW.$$

Wir vernachlässigen den geringen Strom, welcher für den Nebenschluss der Feldmagnete erforderlich ist. Die Gleichung zeigt, dass für die Aufrechterhaltung einer konstanten Geschwindigkeit des Motors die elektromotorische Kraft der Quelle mit der Belastung wachsen muss. Sie hat den kleinsten Werth, wenn der Motor leer läuft, und den grössten, wenn Belastung und Strom 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 bei konstanter Geschwindigkeit laufen lassen, wenn man eine überkompoundirte Dynamomaschine als Generator verwendet. Das Princip der Dynamomaschine mit Compound- oder gemischter Wicklung 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 äusseren 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 Nebenschlusspulen ab. Wenn die Maschine richtig konstruiert ist, so soll dieser Magnetismus eine elektromotorische Kraft erzeugen, die genau gleich derjenigen ist, die bei allen Stromstärken des äusseren Kreises bestehen bleiben soll, vorausgesetzt, dass die Dynamomaschine mit konstanter Geschwindigkeit läuft. Wenn ein Strom durch den Anker fliesst, 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 wachsendem Strome immer mehr abnimmt. Um diesen Verlust zu kompensieren, 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 kompondirten Maschine reicht die Zunahme des Magnetismus, welche von der Hauptspule herrührt, grade aus, um die Klemmenspannung bei allen Stromstärken konstant zu halten. Wir sagen alsdann, die gemischte Wicklung der Maschine ist für konstante Klemmenspannung richtig bemessen.

Nun sehen wir leicht, dass wir hierin zu weit gehen können, wenn wir etwas feineren Draht für den Nebenschluss nehmen oder die Windungszahl der Hauptwicklung vergrössern. Durch die erste Anordnung wird die Spannung der Maschine zu klein. Im anderen 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, welcher durch Widerstand und Selbstinduktion verursacht wird, das Gleichgewicht hält, und die Folge ist, dass die Klemmenspannung steigt, wenn der Strom 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 System der Kraftübertragung bei konstanter Geschwindigkeit erhalten.

Theoretisch betrachtet ist dies ganz richtig, aber in der Praxis entsteht eine Schwierigkeit, welche davon herrührt, dass die Polarität einer Kompoundmaschine sich 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 mit konstanter Geschwindigkeit einzu-

richten, aber es ist ihm aus dem angegebenen Grunde nicht gelungen. Der Misserfolg war jedoch lehrreicher, als wenn das System mit theoretischer Vollendung gewirkt hätte. Es wurde deshalb in der Zeitschrift „The Electrician“ (April 1885) darüber berichtet; im Folgenden geben wir davon einen Auszug:

„Wenn eine Hauptstromdynamomaschine als Motor benutzt wird, so läuft sie in der entgegengesetzten Richtung, wie wenn sie als Generator wirkte. 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 übercompoundirten Dynamomaschine getrieben, deren Nebenschluss im Verhältniss zu der Hauptstromwicklung schwach war. Wenn der Motor wenig oder gar keine äussere Arbeit leistete, verhielt er sich höchst sonderbar: er lief abwechselnd rück- und vorwärts. Bei jeder Umkehrung entstanden grosse 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 an den Leitungen vom Generator her immer eine gewisse Spannung herrscht, so geht in dem Moment, wo man den Motor einschaltet, ein starker Strom durch dessen Anker und ein kleiner Strom durch die Magnetwicklung. Die unmittelbare Folge davon ist, dass der Anker mit grosser Geschwindigkeit sich zu drehen beginnt, bevor die Magnete vollständig erregt sind; denn man muss daran denken, dass ein Anker sich in einem nicht erregten Felde dreht, allerdings bei bedeutendem Stromaufwand. Die Geschwindigkeit, welche nöthig ist, um eine gegebene elektromotorische Kraft hervorzubringen, ist um so grösser, je schwächer die Erregung der Feldmagnete ist; folglich geht der Motor mit viel grösserer Geschwindigkeit an, als in regelmässigen Betrieben 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 lebendige Kraft

des Ankers zu. Sind zuletzt die Feldmagnete gesättigt, so hat der Anker des Motors eine solche Geschwindigkeit erreicht, dass seine elektromotorische Kraft nicht nur der Potentialdifferenz der Kabel, welche den Strom von dem Generator zuführen, gleich ist, sondern sie sogar übertrifft und eine Umkehrung der Stromrichtung bewirkt. Der Motor wirkt als Generator, indem die lebendige Kraft des Ankers in Form von Elektrizität dem Stromkreise wieder zugeführt wird. In Folge davon werden die Pole der Compoundmaschine (deren Nebenschlusswicklung, wie oben erwähnt wurde, schwach ist) umgekehrt, und nun arbeiten die Anker des Generators und des Motors hintereinander, indem ersterer den Strom des Motors 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 nun eine grosse elektromotorische Gegenkraft dem Strome entgegen, welcher vom Generator kommt; aber diese Kraft wächst 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 bei diesen Magneten 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 wie der erste hat. 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 Grammesche Hauptstrommaschine als Generator und eine magnetoelektrische Maschine als Motor benutzte. Er nannte die Erscheinung ein elektrodynamisches Paradoxon; eine Beschreibung desselben findet sich in „The Engineer“ vom 17. September 1880.

Kapitel VI.

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 Elektrizitätserzeugung verschiedene Systeme der elektrischen Kraftübertragung unterscheiden. In den Anwendungen derselben 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 vermittelt 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 sämtliche Motoren von einander unabhängig sein und, ob sie nun leer oder belastet laufen, stets dieselbe Geschwindigkeit haben müssen. 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 unter diesen Verhältnissen an das allgemeine Leitungsnetz angeschlossen und wird, wenn Kraft gebraucht wird, eingeschaltet. Hierdurch darf die Stromabnahme, die vielleicht zu Beleuchtungszwecken oder zum Betriebe anderer Motoren an einer anderen Stelle des Leitungsnetzes stattfindet, nicht beeinflusst werden. Zum anderen muss der Motor stets mit derselben Geschwindigkeit laufen, ob er nun wenig oder viel Arbeit leistet. Denn die meisten Arbeiten, die den Gebrauch von 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, dieselben einander anzupassen, und es hat keine Schwierigkeit, eine gleichförmige Geschwindigkeit einzuhalten, da in der Regel die Belastung 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, in Rücksicht sowohl auf die Anlagekosten als auch auf einen wirthschaftlichen Wirkungsgrad mit hochgespannten Strömen zu arbeiten. Die Verwendung hoher Spannungen ist allerdings etwas gefährlich und bietet Schwierigkeiten, da sie eine vorzügliche Isolation erfordert. Beide Punkte können aber bei Anwendung genügender Sorgfalt in der Berechnung und Ausführung der Anlage leicht umgangen werden. Die Gefahr, die die Verwendung elektrischer Ströme von hoher Spannung mit sich bringt, wird gewöhnlich sehr übertrieben. Ein Mensch, der mit den Händen gleichzeitig die positive und negative Leitung an einer nicht isolirten Stelle berührt, kann wohl getödtet oder ernstlich verletzt werden, wenn die Spannung 2000 oder 3000 Volt übersteigt. Die Möglichkeit einer solcher Berührung kann jedoch bei Verwendung der nöthigen Vorsicht fast ganz ausgeschlossen werden. Genau dieselbe

Gefahr bietet die leichte Berührung einer rotirenden Kreissäge, durch die dem Arbeiter sofort die Finger abgeschnitten werden; auch die Zahnräder werden trotz der vielen Unglücksfälle, die sie bereits im Gefolge gehabt haben, verwandt. Es sind Mittel gefunden, um Menschenleben vor der Gefährdung durch mechanische Werkzeuge aufs wirksamste zu schützen, und die Erfahrung der letzten Jahre hat gezeigt, dass es ebenso wirksame Mittel zum Schutze vor den durch elektrische Ströme drohenden Gefahren 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 zu unterscheiden zwischen Vertheilung bei konstanter Spannung und Vertheilung bei konstanter Stromstärke.

Elektrische Vertheilung von Energie bei konstanter Spannung.

Wir wollen nun auf die theoretischen Bedingungen dieses Systems eingehen. Vom Standpunkte eines wirtschaftlichen Betriebes ist es sofort einleuchtend, dass die Verwendung künstlicher Widerstände zur Erzielung einer gleichförmigen Geschwindigkeit nur zu einer theilweisen und unvollkommenen Lösung dieser Frage führen kann und deshalb, wenn andere Mittel zur Verfügung stehen, besser ausser Spiel bleibt. Im vorliegenden Falle haben wir glücklicherweise zwei Mittel, mit Hülfe derer wir ohne Verlust die Leistung des Motors für einen bestimmten Zweck 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 Arbeit in bestimmten Zwischenräumen unterbricht, und zweitens können wir uns einer elektrischen Vor-

richtung bedienen, indem wir die Feldmagnete mit einer besonderen 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 Regulirung¹⁾ einige Angaben über die zuerst angeführte Anordnung gegeben. Sie sagen: „Die Methode der gänzlichen Unterbrechung der Kraftzufuhr ist deshalb sehr mangelhaft, weil die Kraftzufuhr immer vollständig aufhört, während sie nur im gleichen Verhältniss, 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 hyperbolische Form an und sinkt in der Mitte soweit, dass der Kontakt zwischen Draht und Quecksilber unterbrochen wird.“ An einer späteren 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 letzteren ist die Zufuhr der Kraft keinen Augenblick unterbrochen, aber sie ist während der verschiedenen Phasen einer Umdrehung eine verschiedene. Der Zeitraum, in dem während einer Umdrehung dem Motor mehr oder weniger Kraft 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. 65, 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 die-

¹⁾ Journal of the Society of Telegraph Engineers and Electricians Vol. XII, No. 49.

selbe das Kontaktstück B berührt, 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 die Regulatorkugeln von einander, so wird die Bürste in der Weise auf dem Cylinder BK verschoben, dass sie während eines grösseren Theiles einer Umdrehung den Theil K berührt; nähern sich bei fallender Umdrehungszahl des Motors die Kugeln einander, so wird die Bürste in entgegengesetzter Richtung auf dem Cylinder entlang bewegt und liegt in Folge dessen während des grösseren 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

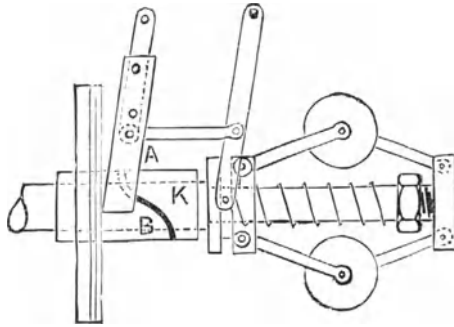


Fig. 65.

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 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 bei Berührung der Bürste mit K der Nebenschluss von einem Theile des Stromes durchflossen wird.“

Es scheint, als litten diese beiden von Ayrton und Perry angegebenen Regulierungsmethoden 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 bei Nebeneinanderschaltung den Widerstand möglichst hoch nimmt und bei Hintereinanderschaltung möglichst gering. Aus rein theoretischen Gründen könnte ein Verlust gänzlich vermieden werden, wenn man bei Nebeneinanderschaltung den Widerstand 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 andererseits 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 sagen deshalb in ihrem Vortrage, dass bei allen derartigen Regulatoren Funkenbildung nicht zu vermeiden sei und dass man deshalb Motoren mit einer solchen Bewicklung den Vorzug geben müsse, vermöge der sie sich ohne jegliche mechanische Vorrichtung selbst reguliren.

Ein selbst regulirender Motor ist die Umkehrung einer selbst regulirenden Dynamomaschine, die für konstante Spannung gewickelt ist. Bei der Compound-Dynamomaschine muss die Klemmenspannung konstant gehalten werden, wenn auch der Widerstand des äusseren Stromkreises in weiten Grenzen eine Veränderung erfährt. Dies hat ein Anwachsen der Stromstärke bei Abnahme des äusseren Widerstandes zu 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 — Kraft zum Betriebe der Maschine ebenfalls variabel, aber proportional der Stromstärke.

Ein selbst regulirender 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. Auf Grund dieser allgemeinen Umkehrbarkeit lässt sich erwarten, dass eine gut compoundirte Dynamomaschine zufolge der zwischen den Feldmagneten und dem Anker bestehenden Beziehung ohne weiteres als selbstregulirender Motor benutzt werden kann, unter der einzigen Bedingung, dass der Strom bei konstanter Spannung zugeführt wird. Wenn man von einem selbstregulirenden Motor in dem Sinne spricht, 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 dem zufolge seine Selbstregulirung aufhören, gerade so wie die Spannung der besten Compound-Dynamomaschine sinken wird, wenn wir ihr zuviel 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 Ergebniss 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 in Kapitel III lässt sich der Beweis leicht führen. Nach Gleichung (7) ist die Zugkraft P , die der Ankerstrom J_a in einem Felde von Z Kraftlinien ausübt, im absoluten Masse

$$P = \frac{Z N t J_a}{\pi}.$$

Sie ist demnach unabhängig von der Geschwindigkeit und, da Nt 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 des Stromes ausgleichen. Unter der Annahme, dass die Nebenschlusswicklung der Feldmagnete parallel zum äusseren

Stromkreise — nicht zum Anker — liegt, haben wir unter Beibehaltung der Bezeichnungen aus Kapitel II 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)

$$E_a = Z N t v 10^{-6}$$

$$E_k - (w_a + w_d) J_a = Z N t n 10^{-6}.$$

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

$$E_k - (w_a + w_d) J_a + Z N t n 10^{-6} = \text{Konst.}$$

Da nun 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, dass der Motor ein selbstregulirender ist, besteht darin, dass die Feldstärke in bestimmter, durch die nachfolgende Gleichung ausgedrückter Beziehung zur Stromstärke im Anker steht; es muss sein

$$Z = \frac{E_k - (w_a + w_d) J_a}{N t n} 10^6.$$

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 Ergebniss: 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 wird zeigen, dass eine derartige Anordnung die Geschwindigkeit verlangsamten würde. Die magnetische Anziehung, welche die Feldmagnete auf den Anker ausüben, hängt nicht allein von der Feldstärke ab, sondern sie ist gleich dem Producte dieser Grösse und der Strom-

stärke im Anker. Sie wird daher in jedem Falle zunehmen, ob wir nun das Feld verstärken oder ob wir 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), Seite 66, ergibt, und verringern auf diese Weise die Stromstärke im Anker zu einer Zeit, in der wir am meisten Kraft nöthig haben. Der Motor würde deshalb so lange langsamer laufen, bis seine elektromotorische Gegenkraft soweit abgenommen hat, dass ein Strom von der für die zu leistende Arbeit genügenden Stärke den Anker durchfliesst. Wenn wir auf der anderen Seite die Zugkraft des Ankers dadurch zu vergrössern suchen, dass wir einen stärkeren 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

$$Z = \frac{E_k 10^6}{Ntn},$$

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 bestrebt sind, die Feldmagnete zu entmagnetisiren. Bei einer Compoundmaschine 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 Compoundmaschine kann entweder als selbstregulirender Generator oder als selbstregulirender Motor benutzt werden. Es mögen kleine Unterschiede bei der Wahl des Verhältnisses der Zahl der directen Windungen zu der der Nebenschlusswindungen vorhanden sein, aber das allgemeine Prinzip der Compoundwicklung 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 am schwächsten ist, ein Motor ohne Selbstregulirung aber jeder Zeit so konstruirt werden kann, dass er bei höchster Feldstärke auch am meisten leistet, so muss, wie ohne weiteres einzusehen, der selbstregulirende Motor 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 ab von dem Produkte $(w_a + w_d) J_a$. 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, mit dem Widerstande von Anker und direkter Wicklung möglichst herunterzugehen. 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 umfassen und

so im Stande sein, $7\frac{1}{2}\%$ mehr an mechanische Energie zu entwickeln. Wenn auf der anderen Seite die beiden Motoren die gleiche maximale mechanische Energie leisten sollen, so müssten die Feldmagnete des selbstregulirenden Motors einen um $7\frac{1}{2}\%$ grösseren Querschnitt haben. Da ferner die direkten und Nebenschlusswindungen sich entgegenwirken, so ist auch ein grösserer Aufwand an Kupfer erforderlich, der sich auf etwa $2\frac{1}{2}\%$ des Gesamtgewichts belaufen wird. Ein selbstregulirender Motor wiegt daher alles in allem 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 denn auch in allen Städten, in denen elektrische Centralen nach dem Parallelschaltungssystem die Beleuchtung besorgen, die Erfahrung gezeigt, dass die Benutzung desselben Kabelnetzes zur Vertheilung motorischer Kraft an Handwerker und Kleingewerbetreibende unter Verwendung derartiger selbstregulirender Motoren äusserst vortheilhaft ist.

Elektrische Energievertheilung bei konstanter Stromstärke.

Diese Aufgabe ist nicht so leicht zu lösen, wie die der Energievertheilung bei konstanter Spannung, und die sich darbietenden Schwierigkeiten sind fundamentaler Natur. Es beruht dies darauf, dass die Geschwindigkeit des Motors nicht in direkter Beziehung zum Ankerstrom steht. Bei der direkten Abhängigkeit der Geschwindigkeit von der elektromotorischen Kraft ist für konstante Spannung eine Selbstregulirung möglich, ohne dass man äussere Hilfsmittel in Gestalt einer mechanischen Steuerung oder einer anderen 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 Cap. III, Seite 73 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 ein- und demselben Stromkreise 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 die geringste Veränderung der Reibung der Bremszäume brachte zunächst den einen und dann den anderen 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 kon-

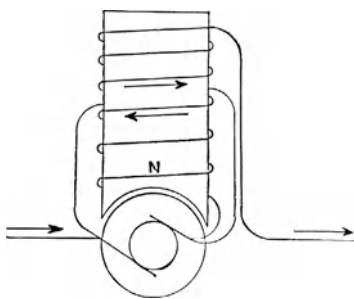


Fig. 66.

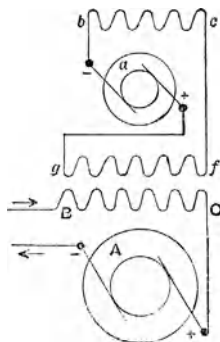


Fig. 67.

stante Stromstärke selbst reguliren sollen: Die Feldmagnete, Fig. 66, erhalten zwei einander entgegenwirkende Wicklungen. Die eine aus dünnem Draht ist der Ankerbewicklung parallel geschaltet. Die andere, aus dickem Draht, wird vom Ankerstrom durchflossen. Anker und Nebenschlusswicklung stellen einen Nebenschlussmotor dar, während Anker und Hauptstromwicklung wie ein bremsender Generator wirken, der jeden Ueberschuss an Kraft in sich aufzunehmen bestrebt ist, wenn die Belastung zu gering wird. Soweit dem Verfasser bekannt, ist dies System praktisch nicht erprobt worden; 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 ab-

gepasst werden, dass für eine gegebene Belastung das Feld grade die richtige Stärke hätte, um die normale Geschwindigkeit hervorzu- bringen. Wenn jetzt die Belastung um einen äusserst geringen Betrag erhöht wird, so wird die unmittelbare Folge hiervon 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 Verhältniss der magnetisirenden Kräfte der beiden gegen einander wirkenden Wicklungen ab.

In einer späteren Abhandlung, welche 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 den Feldmagneten ganz fortlässt und in den Ankerstromkreis eine Accumulatorenbatterie einschaltet, deren elektromotorische Kraft den Strom verstärkt. Soweit dem Verfasser bekannt ist, sind praktische Versuche auch mit diesem System 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 derer bei Aenderung der Belastung entweder die Bürsten verstellt werden, oder die erregende Kraft verändert wird. Der Versuch, eine Selbstregulirung derartiger Motoren ohne Hinzufügung solcher 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 Fig. 67 abgebildet. A ist der Anker eines Hauptstrommotors und ist auf derselben Axe mit einem zweiten Anker a einer kleineren

Hauptstrommaschine befestigt; letztere hat nur den Zweck, Strom zur Schwächung der Feldmagnete des Motors zu liefern. Der Hauptstrom magnetisirt dieselben, indem er sie in der Richtung von B nach C umfließt, der Hilfsstrom der Dynamomaschine fließt in der Richtung von f nach g und hat das Bestreben, die Feldmagnete zu schwächen. bc 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 kleineren 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 bei einer geringen Erhöhung der Belastung seine Geschwindigkeit unmittelbar geschwächt, und die der kleinen Dynamomaschine liegt daher unter der kritischen. Die Dynamomaschine wird deshalb theilweise oder gänzlich aufhören, Strom zu liefern, und ihr demagnetisirender Einfluss, der bislang die Feldstärke unter ihrem höchsten Betrage hielt, wird in geringerem oder stärkerem Masse 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; aber demselben wirkt sofort die Hilfsdynamomaschine entgegen, 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 Hilfsdynamomaschine aus sehr weichem Eisen hergestellt werden, damit man möglichst frei vom Einfluss des remanenten Magnetismus wird, der den Werth der kritischen Geschwindigkeit vermindern würde, je nachdem der Magnetismus steigt oder fällt. Aus diesem Grunde ist auch nöthig, die beiden Anker in beträchtlicher Entfernung von einander auf der Axe anzubringen, damit die Feldmagnete des Motors nicht inducierend 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 diene.

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 mittelst 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 höherem Betrage als i belastet sein, und der dem Leitungswiderstande entsprechende Spannungsverlust wird deshalb grösser sein, als das Produkt aus diesem Widerstande und dem Motorstrom i . Wenn die Leitung auf

ihrer gesammten Länge gleich gut isolirt ist, so wird die Längeneinheit überall den gleichen Isolationswiderstand haben, der im Vergleiche zum Leitungswiderstande selbst sehr hoch sein müsste. Bezeichnet man mit W_1 den Leitungswiderstand der Linie 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 Wheatstoneschen Brücke bestimmen können, $= \frac{\rho}{l}$. Wenn

man diesen Betrag nun wirklich gemessen hat, so sollte man annehmen, dass der Stromverlust $J - i$ nach dem Ohmschen 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 Verhältniss 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, die jedoch für praktische Zwecke genügende Genauigkeit besitzt, ist die 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:

$$-d\varepsilon = i \frac{W_1}{l} dx$$

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

Hieraus folgt

$$\varepsilon d\varepsilon = \frac{W_1}{l} \rho i di$$

und durch Integration

$$\varepsilon^2 - \frac{W_1 \rho}{l} i^2 = \text{Konst.}$$

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

$$E_k^2 - e^2 = \frac{W_1 \varrho}{1} (J^2 - i^2),$$

woraus weiter folgt

$$i = \sqrt{J^2 - \frac{1}{W_1 \varrho} (E_k^2 - e_k^2)}$$

Diese Formel gibt 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 die zweiten und die höheren Potenzen enthaltenden Glieder

$$i = J - \frac{1}{2} \frac{1}{W_1 \varrho} \cdot \frac{E_k^2 - e_k^2}{J}.$$

Nun ist

$$E_k^2 - e_k^2 = (E_k + e_k)(E_k - e_k)$$

und

$$\frac{\varrho}{1} = W_i,$$

wenn W_i den gesammten Isolationswiderstand der Leitung bedeutet. Demnach ist

$$i = J - \frac{E_k + e_k}{2} \cdot \frac{1}{W_i} \cdot \frac{E_k - e_k}{W_1 J}.$$

Der Stromverlust ist also

$$J - i = \frac{E_k + e_k}{2} \cdot \frac{1}{W_i} \cdot \frac{E_k - e_k}{W_1 J} \quad \dots \quad (30).$$

$\frac{E_k + e_k}{2}$ ist das Mittel aus den an den beiden Enden der

Linie herrschenden Spannungsdifferenzen, und $\frac{E_k + e_k}{2} \cdot \frac{1}{W_i}$ bezeich-

net den Strom, der bei dieser mittleren Spannungsdifferenz durch W_i , den gesammten Widerstand der Isolation, fliessen würde. Dieser

Strom multiplicirt mit $\frac{E_k - e_k}{W_1 J}$ giebt den wirklich stattfindenden

Stromverlust. Man sieht, dass $W_1 J$, als das Produkt eines Wider-

standes und einer Stromstärke, eine Spannungsdifferenz darstellt. In diesem speciellem Falle bedeutet dasselbe diejenige elektromotorische

Kraft, die zur Erzeugung eines Stromes J in einer vollständig iso-

lirten Leitung vom Widerstande W_i nöthig sein würde, vorausgesetzt,

dass die entfernten Enden in metallischem Kontakt ständen. $W_1 J$ 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 Verhältniss dieser Grösse zu der ersteren stets grösser als Eins sein. Hieraus folgt, dass der auf mangelhafte Isolation zurückzuführende Stromverlust erheblich grösser ist als diejenige Zahl, die wir erhalten würden, wenn wir den Mittelwerth aus den Spannungsdifferenzen an den Enden der Leitung durch den gesammten Isolationswiderstand dividiren. Wenn der Isolationswiderstand sehr hoch und der Leitungswiderstand sehr gering ist, 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, muss Formel (30) benutzt werden.

Es ist an dieser Stelle nöthig, den Einfluss des Stromverlustes auf den gesammten Wirkungsgrad des Systems der elektrischen Kraftübertragung mit besonderer Berücksichtigung der wirtschaftlich günstigsten Geschwindigkeit des Motors kurz zu betrachten. In Lehrbüchern und Abhandlungen über diesen Gegenstand wird allgemein die Annahme gemacht, dass die Isolation der Leitung eine vollständige ist. Dies mag in einigen günstigen Fällen stattfinden, 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, die in der Zeitschrift, „The Engineer“ 1883 erschien. 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 Kap. V, S. 122 ausgeführt, dass dies, selbst wenn die Klemmenspannung des Motors stets konstant bliebe, vollständig falsch ist. Es würde der Fall sein, wenn als Generator eine selbstregulirende Dynamomaschine in der Nähe des Motors aufgestellt und mit ihm durch annähernd widerstandlose und vollkommen isolirte Leitungen verbunden wäre. Aber wenn die Leitungen beträchtlichen Widerstand haben und besonders wenn ihre Isolation nicht ganz vollkommen ist, so wird

der oben aufgestellte Satz, der beständig von allen späteren Autoren wiederholt wurde, immer sinnwridiger. 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 Arbeitsstrom 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 die vom Motor geleistete Arbeit anfangs mit derselben 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 richtig stellen. Für diesen Fall erhalten wir bestimmte Werthe für 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. Dies wird die dem Motor zugeführte elektrische Energie verkleinern, und ebenso die von ihm geleistete Arbeit. Augenscheinlich kann dieser Verlust ersetzt werden, indem man den Generator mit höherer Geschwindigkeit laufen lässt, oder mit anderen 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 durch Anwendung der Formel (30). Dies giebt eine neue Reihe von Bedingungen für den Generator, nach der die zur Betreibung des letzteren nöthige Energie berechnet werden muss. Die für den Motor gültigen Bedingungen werden dadurch nicht verändert.

Der Spannungsverlust in den Leitungen ist iW_1 und muss gleich der Differenz der Klemmenspannungen des Generators und des Motors, sein also

$$E_k = iW_1 + e_k.$$

Die im Innern des Generators aufgewandte elektrische Energie ist $E_a i$, die im Inneren des Motors aufgewandte $e_a i$ und das Verhältniss zwischen diesen beiden Grössen ist der elektrische Wirkungsgrad η des gesammten Systems, also

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

Durch Kombination dieses Ausdrucks mit den obigen Gleichungen finden wir demnach

$$\eta = \frac{e_a}{e_a + i(W_1 + w_a + w_m + W_a + W_m)}.$$

Wie gross nun auch der Widerstand der Leitung W_1 sein mag oder mit anderen 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 zum anderen 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 Ergebniss nicht beeinflussen, wenn die elektromotorische Kraft in demselben Masse wachsen würde, wie der Widerstand der Maschine. Aber dies ist nicht der Fall. Nehmen wir einmal zwei vollkommen gleiche Anker an und bewickeln den einen mit vielen Windungen dünnen Drahtes, während wir den anderen mit einem dickeren Drahte bewickeln, dabei aber den Wicklungsraum genau in derselben Weise ausnutzen, wie im ersten Falle, so muss das Kupfergewicht auf dem Anker mit dickem Drahte immer etwas grösser sein als das auf dem anderen, da der von der Isolation eingenommene Raum in diesem Fall der kleinere ist.

Man kann ja begreiflicher Weise die Dicke der Isolation nicht in derselben Weise verringern, wie den Durchmesser des Drahts. Ein bestimmter geringster Betrag für die Dicke der Umspinnung ist unbedingt erforderlich, um sie überhaupt mit der nöthigen Sicherheit herstellen zu können, und dieses ist um so mehr der Fall, wenn der dünnere Draht zur Bewickelung von Ankern mit hoher elektromotorischer Kraft benutzt werden soll; 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 umspinnenen Drahtes wird unter diesen Umständen um 0,4 mm grösser als der des blanken Drahtes. Nun kann man 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 geringerem Energieverlust für die Erwärmung des Ankerdrahtes erhalten werden kann. Dasselbe gilt auch für die Bewickelung der Feldmagnete. Die mit dickerem Draht bewickelte Dynamomaschine wird deshalb am günstigsten arbeiten, da ihr innerer Widerstand im Verhältniss zur elektromotorischen Kraft kleiner sein wird. Umgekehrt, wenn wir die Maschinen (Generator und Motor) mit sehr feinem Draht bewickeln, 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 geringeren Wirkungsgrad der Kraftübertragung. Berücksichtigen wir jetzt den Leitungswiderstand W_1 , so arbeitet man um so günstiger, je höher die elektromotorische Kraft ist; es muss daher, wenn wir beides überlegen, einen bestimmten Werth für die elektromotorische Kraft geben, für den der elektrische Wirkungsgrad ein Maximum wird. Dieser Werth kann für jeden gegebenen Fall gefunden werden, indem wir für Generator und Motor verschiedene Wicklungen annehmen und für dieselben 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 wirtschaftlichen Wirkungsgrad handelt. Es ist verschiedentlich behauptet, dass der wirtschaftliche Wirkungsgrad von Dynamomaschinen und Motoren in ganz bestimmter Beziehung zu ihrem elektrischen Wirkungsgrade steht, und man könnte demnach den wirtschaftlichen Wirkungsgrad unseres Kraftübertragungssystems erhalten, indem man Gleichung (31) mit einem bestimmten Proportionalitätsfaktor multiplicirt. Es ist jedoch klar, dass der wirtschaftliche 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 Kap. V ausgedrückt, indem man annimmt, dass ein bestimmtes Minimum der Stromstärke, γ , 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 der Stromstärke, g , 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.

$$\text{Zugeführte Arbeit } A = (i + g) E_a.$$

Motor.

$$\text{Geleistete Arbeit } a = (i - \gamma) e_a.$$

Setzt man $W_a + W_m = W$ und $w_a + w_m = w$, so ergibt sich für den Hauptstromgenerator und -Motor

$$\begin{aligned} E_a &= e_a + i(W_1 + W + w) \\ A &= (i + g)(e_a + i(W_1 + W + w)). \end{aligned}$$

Der wirtschaftliche Wirkungsgrad des gesammten Systems ist also

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{i - \gamma}{i + g} \cdot \frac{e_a}{E_a} \\ \eta &= \frac{i - \gamma}{i + g} \cdot \frac{e_a}{e_a + i(W_1 + W + w)} \quad \dots \quad (32). \end{aligned}$$

Eine Frage von praktischer Wichtigkeit ist es ferner: unter welchen Bedingungen wird der wirtschaftliche Wirkungsgrad für ein gegebenes System der Kraftübertragung ein Maximum. 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 des Motors e_a . Wenn wir den Motor zu langsam laufen lassen, so wird die Stromstärke hoch, aber 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 wirtschaftliche Wirkungsgrad herabgedrückt wird. Zwischen diesen beiden äussersten Fällen muss es augenscheinlich eine Stromstärke und eine elektromotorische Gegenkraft geben, für die der wirtschaftliche Wirkungsgrad ein Maximum wird. Um diese Werthe zu finden, bilden wir die ersten Differentialquotienten des Wirkungsgrades nach i und e_a und setzen dieselben gleich Null. So finden wir die günstigste Stromstärke durch die Gleichung

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

und die günstigste elektromotorische Gegenkraft durch die Gleichung

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

Setzen wir der Kürze wegen E statt E_a , e statt e_a und W statt der Summe der Widerstände $W_1 + W + w$, so giebt die erste Gleichung

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

wo i die einzige unbekannte Grösse ist. Durch Auflösung dieser Gleichung für i ergibt sich

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

Man sieht, die Gleichung ergibt 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 un-

serer 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

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

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

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

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 , einen, der kleiner als E , und einen anderen, der grösser als E ist. Der letztere 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

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

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

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

eine Formel, die sich auch durch Einsetzung von

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

in Gleichung (34) ergibt.

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; dass heisst, wenn der Betrieb der Dynamomaschine bei geöffnetem äusseren Stromkreise keine Arbeit erforderte und wenn

der Motor ohne Verbrauch elektrischer Energie leer laufen könnte. Diese beiden Bedingungen sind offenbar absurd.

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

Wir wollen annehmen, dass in einem gegebenen System der elektrischen Kraftübertragung ein Generator mit einer Maximalleistung von 1000 V und 20 Am angewandt wird und dass er unter diesen Umständen einen wirtschaftlichen 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 Am mit einer Maschine von 80% Wirkungsgrad zu leisten, ist ein Aufwand von $18000 \times \frac{100}{80} = 22500$ Watt nöthig. Von diesem Betrage stellen 20000 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 Am. Eine ähnliche Betrachtung mag für den Motor 1,5 Am 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

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

und (35) oder (36) giebt

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

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

$$\eta = \frac{14,5 - 1,5}{14,4 + 2,5} \cdot \frac{790}{1000} = 60\%.$$

Unter der Annahme nun, dass der Generator auf einer Geschwindigkeit gehalten wird, die seiner maximalen Leistung von 1000 V ent-

spricht, müssen wir, um den höchst möglichen Betrag von 60% der aufgewandten Arbeit zurückzuerhalten, den Motor so konstruieren und ihm eine solche Geschwindigkeit ertheilen, dass in ihm eine elektromotorische Gegenkraft von 790 V erzeugt wird. Die Stromstärke wird dann 14,5 Am betragen, und die Energie, die vom Motor abgegeben wird, ist

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

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

Elektromotorische Gegenkraft	Stromstärke	Wirtschaftl. Wirkungsgrad %	Am Motor verfügbare Kraft in P. S.
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 für Stromstärken, die entweder grösser oder kleiner als 14,5 Am sind, der Wirkungsgrad kleiner als 60% ist, dass aber die Abnahme desselben sich auf wenige Procent beschränkt, wenn auch die übertragene Kraft sich erheblich verändert. Dies ist eine sehr werthvolle Eigenschaft der elektrischen Kraftübertragung; sie erlaubt eine Veränderung der Kraft in weiten Grenzen ohne erhebliche Abnahme des Wirkungsgrades. Die grosse Bedeutung dieses Umstandes tritt mehr hervor, wenn wir einmal die elektrische Kraftübertragung mit der hydraulischen vergleichen. Im letzteren System verbraucht der Motor stets das gleiche Quantum Wasser, wie gross auch die geleistete Arbeit ist, und da der Druck konstant ist, so ist der Wirkungsgrad sehr niedrig, wenn der Motor unter seiner normalen Belastung arbeitet.

Das System der Kraftübertragung vermitteltst zweier Hauptstrom-Dynamomaschinen besitzt einen weiteren Vorzug darin, 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 jeglicher 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 Spannung steigen, wenn die Belastung wächst; und im zweiten Fall muss die Stromstärke zunehmen, wenn

die Belastung erhöht wird, während die eine oder die andere dieser Grössen an der Erzeugungstation konstant gehalten wird. Aber bei der Hauptstrommaschine ist weder Stromstärke noch Spannung konstant, sondern beide ändern sich zufolge einer gewissen gegenseitigen Abhängigkeit. 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. 68 möge OE die gewöhnliche Charakteristik des Hauptstromgenerators vorstellen; die Kurve soll für eine bestimmte Geschwindigkeit, sagen wir, 1000 Umdrehungen in der Minute, gezeichnet sein. Oe mag die Charakteristik des Motors ebenfalls für 1000 Umdrehungen darstellen. Die elektromotorische Gegenkraft, die im

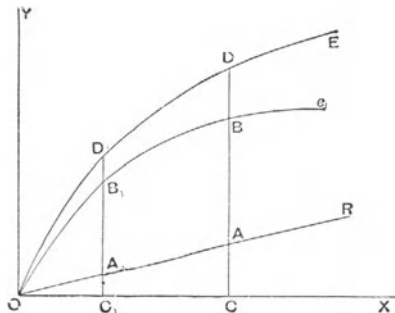


Fig. 68.

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 OC₁ eine elektromotorische Kraft C₁B₁ u. s. w. In der Dynamomaschine sind die den Stromstärken OC und OC₁ entsprechenden elektromotorischen Kräfte bzw. CD und C₁D₁. Zieht man OR unter einem solchen Winkel gegen die Horizontale, dass die trigonometrische Tangente desselben den numerischen Werth der Summe der Widerstände (W + w + W₁) 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 OC₁ durch C₁A₁ 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_1D_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, das $C_1A_1 = B_1D_1$ und $CA = BD$ ist.

Die Lösung der Aufgabe besteht also deshalb in einer sorgfältigen Auswahl von Motor und Dynamomaschine, so dass ihre Charakteristiken so gut wie möglich in der beschriebenen Weise zu einander passen. Unter diesen Umständen ist das System ohne irgend welche Vorsichtsmaßregeln und Hilfsmittel selbstregulirend. 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 einen Kurve von dem Verlauf sehr geringfügig ist, der durch die andere bedingt ist. Das System wird deshalb innerhalb dieser Grenzen annähernd selbstregulirend sein. Vor einigen Jahren hatte der Verfasser Gelegenheit, die Richtigkeit dieser Theorie zu prüfen. Er verwandte die elektrische Kraftübertragung, um in einer Maschinenfabrik die Modellwerkstätte mit Kraft zu versorgen; dieselbe war so gelegen, dass sie vermittelst mechanischer Uebertragung nicht erreicht werden konnte. Die für die Holzbearbeitungs-Maschinen einschliesslich der Band- und Kreissägen nöthige Kraft war 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. Der Generator war eine Bürginsche Dynamomaschine, die von der Hauptmaschine in einem anderen Theile der Fabrik mit konstanter Geschwindigkeit angetrieben wurde; der Motor war gleichfalls eine Bürginsche Dynamomaschine, aber für niedrigere Spannung

gewickelt. Der Unterschied zwischen den beiden Charakteristiken OE und Oe, Figur 68, war bedeutend und um zwei Punkte C₁ 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 gebraucht, und die automatische Regulirung wäre ebenso gut gewesen.

In den letzten Jahren ist diese Methode zur Erhaltung konstanter Geschwindigkeit für den Motor bei elektrischen Kraftübertragungen sehr häufig von C. E. L. Brown, dem Director der Maschinenfabrik Oerlikon in der Schweiz, in den verschiedenen Anlagen dieser Firma angewandt worden. Durch sorgfältige Konstruktion der Dynamomaschinen hat es Brown erreicht, dass die grössten Schwankungen des Motors bei Leerlauf und voller Belastung nur 2% betragen.

Gleich gute Erfolge hat kürzlich in dieser Hinsicht von Dolivo-Dobrowolsky bei einer Kraftübertragungsanlage in den Werkstätten der Allgemeinen Electricitäts-Gesellschaft zu Berlin erzielt. Die Selbstregulirung ist hier unter den grössten Schwankungen in der Belastung so vollkommen, dass sie als bester Beweis für die Richtigkeit der oben ausgeführten Theorie dienen kann. Die Anlage besteht aus einem Generator vom Typus der Edisonschen Maschinen für eine Leistung von 20000 Watt bei einer normalen Stromstärke von 25 Am, 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. 69 zu ersehen. Die ausgezogenen Linien beziehen sich auf den Generator, die punktirten auf den Motor. Die Magneterne des letzteren haben etwas geringeren 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 beim Generator die Papierisolation nur 5% des Ankervolumens einnimmt, beträgt beim Motor der durch dieselbe ausgefüllte Raum 25%. Die Ankerbewicklung ist in beiden Maschinen die-

selbe und besteht aus 780 äusseren Leitern deren Widerstand 0,657 Ohm ist. Die Magnetwicklung besteht beim Motor und Generator aus 553 Windungen auf jedem Schenkel. Ihr Widerstand beträgt beim Generator 1,53 Ohm und beim Motor 1,44 Ohm. Der geringere Widerstand der Magnetwicklung des Motors rührt vom geringeren Durchmesser der Magnetkerne her. Parallel zur Magnetwicklung ist beim Generator ferner ein Nebenschluss von 20 Ohm angebracht, der bifilar gewickelt und in Folge dessen frei von Selbstinduktion ist. Durch die Anordnung eines

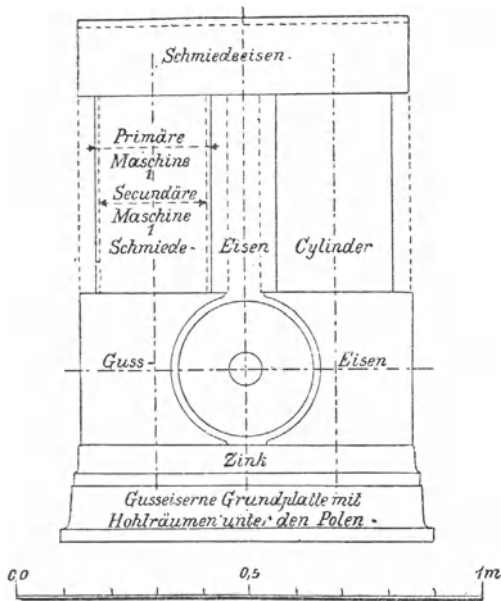


Fig. 69.

solchen Nebenschlusses kann begrifflicher 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 derselbe noch mehr, indem er die Schnelligkeit vergrößert, mit der die eine Maschine den Veränderungen der anderen folgt. Wenn die Belastung des Motors plötzlich verringert wird, so sinkt die Stromstärke in demselben Augenblicke; aber derartige plötzliche Veränderungen des die Feldmagnete umkreisenden

Stromes werden durch den Einfluss der Selbstinduktion verzögert. Das System hat demzufolge eine gewisse Neigung zu Unregelmässigkeiten in der Geschwindigkeit; dieselbe 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

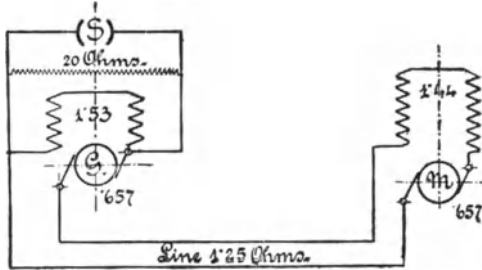


Fig. 70.

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.

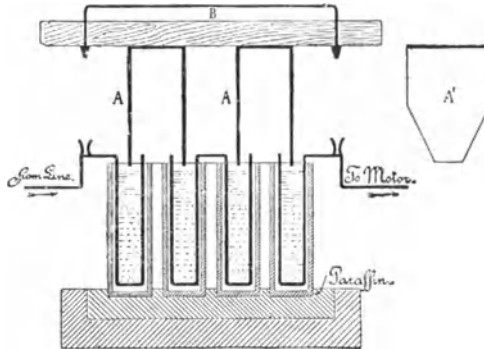


Fig. 71.

Figur 70 zeigt schematisch die Anordnung der Stromkreise. Da die Isolation durchschlagen werden könnte, wenn der Stromkreis durch einen gewöhnlichen Schlüssel unterbrochen würde, so geschieht dies durch einen besonderen 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. 71 abgebildeter Flüssigkeitsrheostat dient dazu, den Motor anzuhalten. Er besteht aus einer Reihe von Gefässen

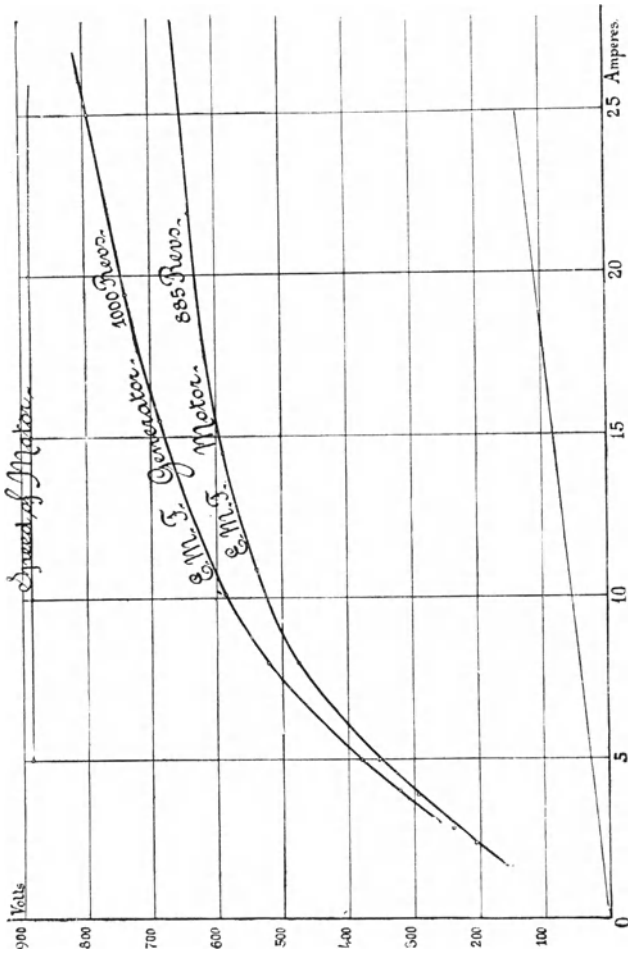


Fig. 72.

mit fünfprocentiger Sodalösung, in die Eisenelektroden A 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 A¹. 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, schliessen diese federnden Kontakte dieselben kurz. Um ein Heraufsteigen der Lösung an den oberen Theilen der Eisenplatten zu verhüten, sind diese mit dickflüssigem Mineralöl bestrichen. Das Eisen wird durch den Strom nicht angegriffen. Für Spannungen bis zu 200 V aufwärts benutzt von Dolivo-Dobrowolsky Flüssigkeitsrheostaten mit nur zwei Gefässen, für Spannungen bis zu 800 V wendet er vier Gefässe an.

Die Kurven in Fig. 72 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 oberen Rande der Figur stellt die Geschwindigkeit des Motors dar, wie sie bei verschiedenen Stromstärken wirklich beobachtet wurde.



Kapitel VII.

Die Leitung. — Beziehung zwischen Anlagekapital und Energieverlust. — Wirtschaftlich günstigster Querschnitt. — Formel für die maximale Stromstärke. — Formel für die mittlere Stromstärke. — Tafeln zur Bestimmung des wirtschaftlich günstigsten Querschnitts. — Erwärmung der Leiter. — Tafeln für die Temperaturzunahme.

Bei jedem ausgedehnteren Systeme der elektrischen Kraftübertragung bildet die Leitung einen wesentlichen Faktor, da durch dieselbe sowohl die Anlage-, als auch die Betriebskosten wesentlich beeinflusst werden.

Wir haben hier zwei besondere Fälle zu betrachten; in dem einen Fall wird die Energie von einer Centralstation übertragen und dann unter eine grosse Anzahl kleiner Arbeitscentren vertheilt, die alle an ein Netzwerk von Leitern, das den Hauptstromkreis bildet, angeschlossen sind; im anderen Falle wird die gesammte Energie längs eines Paares von Leitern ohne irgend welche Verzweigungen zu einer einzigen Empfangsstation geleitet. Der erste Fall entspricht einem System, durch das eine Stadt mit Elektrizität zur Beleuchtung und zum Betriebe von Motoren versorgt werden soll und wo die Lampen und Motoren sämmtlich parallel zu den Hauptleitungen geschaltet sind. Der zweite Fall tritt ein, wenn die Energie von einem für ihre Verwendung ungeeigneten Punkte nach einem hierzu passenden auf beträchtliche Entfernung fortgeleitet werden soll. Welcher besonderen Art aber auch das System der Uebertragung und Vertheilung sein mag, die Anlagekosten für die Leitungen und die laufenden Ausgaben für die Energie, die als Wärme in den Leitern verloren geht, unterliegen Bedingungen, die nicht mit einander verträglich sind. Um an Energie zu sparen, muss man Leitungen von niedrigem Widerstand, also von grossem Querschnitt verwenden. Um die Anlagekosten zu verringern, muss man auf der anderen Seite Leitungen von geringem Gewicht, d. h. von geringem

Querschnitt wählen. Man sieht, Anlage- und Betriebskosten hängen beide vom gewählten Querschnitt der Leitungen ab. Aber während die ersteren mit dem Querschnitt wachsen, sinken die letzteren, wenn man den Querschnitt vergrößert; in jedem elektrischen Kraftübertragungssystem muss es daher wenigstens einen besonderen Leitungsquerschnitt geben, für den die Summe der Zinsen der Anlagekosten und der jährlichen Kosten des Energieverlustes ein Minimum wird. Ohne eine andere Ueberlegung zu berücksichtigen, muss daher dieser Querschnitt 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. die Zinsen, die für das Anlagekapital zu bezahlen sind; 2. die Kosten einer Pferdekraftstunde an den Klemmen des Motors; 3. die Zahl der Stunden im Jahre, in denen die maximale Energie geleistet werden muss, und diejenige, in der drei Viertel, die Hälfte und ein Viertel verlangt wird; 4. die Kosten der Gewichtseinheit der 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 Gesamtgewicht des Leitungsmaterials proportional zu setzen, so gilt für eine gegebene Leitung die Beziehung $pK = cq$, wo K die Gesamtkosten der Leitung, c eine Konstante und p den jährlichen Zinsfuß bezeichnet. Der Widerstand der Leitung ist umgekehrt proportional dem Querschnitt q derselben, 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 ist. Die Gesamtkosten des Betriebes werden ein Minimum sein, wenn

$$\frac{dKp}{dq} + \frac{dV}{dq} = 0$$

ist. Dies ergibt

$$p K = \frac{a k t i^2}{q^2}$$

also

$$q = i \sqrt{\frac{a k t}{p K}}.$$

Setzen wir diesen Werth in die Gleichungen für K und V ein, so finden wir

$$p K = i \sqrt{a k t c p}$$

$$W = i \sqrt{a k t c p}.$$

Folglich

$$p K = W$$

oder der günstigste Leitungsquerschnitt wird derjenige sein, für welchen die jährlichen Zinsen des Anlagekapitals gleich den jährlichen Kosten des Energieverlustes sind. Dieses Gesetz wird gewöhnlich nach Sir William Thomson benannt und wurde von ihm zuerst in einer Abhandlung „die Oekonomie der metallischen Leiter für Elektrizität“ veröffentlicht, welche er der British Association im Jahre 1881 vorlegte. Es ist zu bedenken, dass dies Gesetz in der gegebenen Form nur auf solche Fälle angewandt werden kann, in denen die Kapitalanlage proportional dem Gewichte des Leitungsmaterials ist. In der Praxis findet dies jedoch selten statt. Haben wir ein in die Erde verlegtes Kabel, so werden die Kosten für Aufwerfung und Wiederausfüllung der Gräben für jeden Querschnitt des Kabels dieselben sein; auch andere hierher gehörige Gegenstände, wie Isolationsmaterial, sind nicht gänzlich unabhängig vom Querschnitt, zum wenigsten aber in geringerem Grade unabhängig, als in der Formel angenommen wird. Bei oberirdischen Leitungen können wir die Drahtdicke in ziemlich weiten Grenzen verändern, ohne die Zahl der Träger zu vermehren, und so ist auch hier ein gewisser Theil des Anlagekapitals unabhängig vom Querschnitt der Leitungen. Man schreibt deshalb richtiger

$$K = K_0 + kq,$$

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 verwandten Leitungsmaterials proportional zu betrachten ist.

Forbes¹⁾ hat den Theil des Anlagekapitals, der dem Gewichte des Leitungsmaterials proportional ist, das heisst, die Zunahme des Anlagekapitals, welche eintritt, wenn das Kupfergewicht der Leitung in Folge der Vergrösserung ihres Querschnitts um eine Tonne wächst, „die Mehrkosten für eine Tonne Kupfer“ genannt; er zeigt, dass für einen bestimmten Zinsfuss einschliesslich der Amortisation und für einen gegebenen Kupferpreis der günstigste Leitungsquerschnitt unabhängig von der Spannung und der Entfernung und proportional der Stromstärke ist. Diese Thatsachen ergeben sich auch aus unserer obigen Formel

$$q = i \sqrt{\frac{a k t}{p c}},$$

denn die Quadratwurzel ist für jeden Fall eine Konstante, und weder Spannung noch Entfernung sind in dem Ausdruck für q enthalten, der einfach i proportional ist.

Wenn für ein gegebenes System einer elektrischen Kraftübertragung die zu verwendende Stromstärke festgesetzt ist, so kann man an der

¹⁾ Forbes, Cantor Lecture on „the Distribution of Electricity“. Society of Arts 1885.

Tabelle I.

Jährliche Kosten einer Pferdekraft in Mark.	Leitungsquerschnitt für 100 Am in qcm.																			Jährliche Kosten einer Pferdekraft in Mark.		
	0,4	0,6	0,8	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	2,2	2,4	2,6	2,8	3,0		3,5	4,0
20	80,0	13,0	7,5	4,8																		20
40	60,0	27,0	15,0	9,6	7,9	6,6	5,7	4,9														40
60		40,0	22,0	14,0	12,0	10,0	8,5	7,3	6,4	5,6	5,0											60
80		53,0	30,0	19,0	16,0	13,0	11,0	9,8	8,5	7,5	6,6	5,9	5,3	4,8								80
100		67,0	37,0	24,0	20,0	17,0	14,0	12,0	11,0	9,4	8,3	7,4	6,6	6,0	4,9							100
120		80,0	45,0	29,0	24,0	20,0	17,0	15,0	13,0	11,0	9,9	8,9	7,9	7,2	5,9	5,0						120
140		93,0	52,0	34,0	28,0	23,0	20,0	17,0	15,0	13,0	12,0	10,0	9,1	8,4	6,9	5,8	5,0					140
160			60,0	38,0	32,0	27,0	23,0	20,0	17,0	15,0	13,0	12,0	11,0	9,6	7,9	6,6	5,7	4,9				160
180			67,0	43,0	36,0	30,0	26,0	22,0	19,0	17,0	15,0	13,0	12,0	11,0	8,9	7,5	6,4	5,5	4,8			180
200			75,0	48,0	40,0	33,0	28,0	24,0	21,0	19,0	17,0	15,0	13,0	12,0	9,9	8,3	7,1	6,1	5,3			200
250			93,0	60,0	49,0	42,0	35,0	31,0	27,0	23,0	21,0	19,0	17,0	15,0	12,0	10,0	8,8	7,6	6,6	5,0		250
300				72,0	59,0	50,0	42,0	37,0	32,0	28,0	25,0	22,0	20,0	18,0	15,0	13,0	11,0	9,2	8,0	5,9		300
350				84,0	69,0	58,0	49,0	43,0	37,0	32,0	29,0	26,0	23,0	21,0	17,0	15,0	12,0	11,0	9,1	6,8	5,2	350
400				96,0	79,0	66,0	57,0	49,0	42,0	37,0	33,0	30,0	26,0	24,0	20,0	17,0	14,0	12,0	11,0	7,8	6,0	400
450					89,0	75,0	64,0	55,0	48,0	42,0	37,0	33,0	30,0	27,0	22,0	19,0	16,0	14,0	12,0	8,8	6,9	450
500					99,0	83,0	71,0	61,0	53,0	47,0	41,0	37,0	33,0	30,0	25,0	21,0	18,0	15,0	13,0	9,8	7,7	500

Hand des Gesetzes von Sir W. Thomson des weiteren den günstigsten Leitungsquerschnitt bestimmen. Zu diesem Zwecke müssen die jährlichen Kosten einer elektrischen Pferdekraft einschliesslich Zinsen und Amortisation für Baulichkeiten und Maschinen bekannt sein, ebenso die Mehrkosten für eine Tonne Kupfer, und schliesslich muss festgesetzt werden, wie viel an Zinsen und Amortisation für die Leitungen gerechnet werden soll. Auf Grund dieser Festsetzungen können wir die Konstanten in unseren Formeln bestimmen und sodann die Berechnung leicht ausführen.

Um nun nicht für jeden einzelnen Fall weitläufige Berechnungen durchführen zu müssen, hat Forbes in dem oben erwähnten Vortrage einige sehr nützliche Tabellen aufgestellt, die für deutsche Masse umgerechnet hier mitgetheilt sind.

Tabelle II.

Zinsfuss einschliesslich Amortisation.	Mehrkosten für 1 kg Kupfer in Mark.																Zinsfuss einschliesslich Amortisation.	
	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	5,0	6,0	7,0		8,0
5,0	5,3	5,8	6,2	6,7	7,1	7,5	8,0	8,4	8,9	11,0	13,0	16,0	18,0	22,0	27,0	31,0	36,0	5,0
7,5	8,0	8,7	9,3	10,0	11,0	11,0	12,0	13,0	13,0	17,0	20,0	23,0	27,0	33,0	40,0	47,0	53,0	7,5
10,0	11,0	12,0	12,0	13,0	14,0	15,0	16,0	17,0	18,0	22,0	27,0	31,0	36,0	44,0	53,0	62,0	71,0	10,0
12,5	13,0	14,0	16,0	17,0	18,0	19,0	20,0	21,0	22,0	28,0	33,0	39,0	44,0	56,0	67,0	78,0	89,0	12,5
15,0	16,0	17,0	19,0	20,0	21,0	23,0	24,0	25,0	27,0	33,0	40,0	47,0	53,0	67,0	80,0	93,0	—	15,0

Tabelle I bezieht sich auf den Leitungsquerschnitt für 100 Am, wenn die jährlichen Kosten für eine Pferdekraft zwischen 20 und 500 M liegen. In Tabelle II finden wir die Mehrkosten für ein Kilogramm Kupfer einschliesslich Zinsen und Amortisation. Die Anwendung dieser Tabellen ersieht man am besten an einem Beispiel.

Nehmen wir an, wir hätten 50 Am zu übertragen, die jährlichen Kosten einer Pferdekraft seien 200 M und der vom Kupfergewicht abhängige Theil der Kosten für die Leitungen betrage 3 M für 1 kg Kupfer. Für Zinsen und Amortisation der Leitung sollen 7,5% festgesetzt sein. Wir gehen in Tabelle II längs der horizontalen Reihe, an deren Anfang 7,5 steht, soweit vor, bis wir zu der vertikalen Kolumne kommen, die mit 3 M überschrieben ist. Wir finden hier

die Zahl 20,0. Nun suchen wir in Tabelle I in der horizontalen Reihe, an deren Kopfe sich die Zahl 200 befindet, bis wir wieder die Zahl 20,0 oder eine ihr nahe kommende gefunden haben. Im vorliegenden Falle 21,0 und 19,0. Die am Kopf der vertikalen Kolumne verzeichnete Zahl giebt dann den für 100 A m nöthigen Querschnitt. Wir finden im vorliegenden Falle, dass wir den Leitungsquerschnitt zwischen 1,5 und 1,6 qcm, sagen wir also im Mittel zu 1,55 qcm zu wählen haben. Da jedoch der zu übertragende Strom 50 A m und nicht 100 A m ist, so muss der Leitungsquerschnitt $\frac{50}{100} 1,55 = 0,775$ qcm sein. Wenn wir einen grösseren Querschnitt annehmen, wäre das System weniger wirthschaftlich, da das Anlagekapital zu gross werden würde, und ebenso, wenn wir einen kleineren Querschnitt wählen, denn in diesem Falle würde der Energieverlust zu gross werden.

Wir haben der Berechnung des Querschnitts die Annahme zu Grunde gelegt, dass die maximale Stromstärke von 50 A m während der ganzen Betriebszeit der Anlage im Jahre geliefert werden müsste, oder in anderen Worten, dass der Motor stets mit voller Belastung laufen soll. Dies wird jedoch in der Praxis selten der Fall sein. Mögen wir nun Strom zum Betriebe von Strassenbahnen, zu Beleuchtungszwecken, zum Betriebe von Drehbänken oder allgemein von Werkzeugmaschinen, oder als Betriebskraft für eine ganze Fabrik gebrauchen, der Bedarf an elektrischer Energie wird zu verschiedener Zeit ein verschiedener sein. Wir haben gesehen, dass man Energie auf drei verschiedene Arten elektrisch übertragen kann. Erstens können wir die Stromstärke konstant halten und die Spannung des Generators je nach dem Kraftbedarf an der Empfangsstelle verändern. Zweitens können wir mit konstanter Spannung arbeiten und die Stromstärke nach dem Kraftbedarf verändern. Drittens können wir sowohl Stromstärke, wie auch Spannung verändern. Im ersten Falle bei konstanter Stromstärke ist die obige Formel für den wirthschaftlich günstigsten Querschnitt unter allen Umständen anwendbar, wie gross auch die Unterschiede der zu übertragenden Energie zu den verschiedenen Tages- oder Jahreszeiten sein mögen. In den beiden anderen Fällen muss eine Korrektion angebracht werden, die die Stunden in Rechnung setzt, während welcher ein geringerer Strom die Leitungen durchfliesst; in diesem Falle müsste der wirthschaftlich günstigste Leitungsquer-

schnitt kleiner sein als derjenige, der dem Maximalstrom entspricht. Diese Korrektur muss augenscheinlich in folgender Weise angebracht werden. Wir führen unsere Berechnung nicht für die maximale Stromstärke durch, sondern für eine reducirte Stromstärke, die um so kleiner sein wird, je grösser die Stundenzahl, während der ein geringerer Strom die Leitungen durchfliesst, gegen die ist, während welcher die maximale Stromstärke im Leitungsnetze herrscht. Auf den ersten Blick scheint es, als könne die reducirte oder mittlere Stromstärke gefunden werden, indem man einfach die Gesamtzahl der Ampère-Stunden im Jahre durch die Zahl der Stunden im Jahre theilte. Dies würde jedoch aus dem Grunde nicht richtig sein, da der Energieverlust nicht der Stromstärke direkt, sondern ihrem Quadrate proportional ist. Wenn t_1, t_2, t_3, t_4 die Stundenzahl bezeichnet, während der bezw. ein Viertel, die Hälfte, drei Viertel oder der maximale Strom im Jahre die Leiter durchfliesst, so ist der Gesamtverlust an Pferdekraft-Stunden im Jahre

$$V = \frac{a}{q} \left(\left(\frac{i}{4} \right)^2 t_1 + \left(\frac{i}{2} \right)^2 t_2 + \left(\frac{3i}{4} \right)^2 t_3 + i^2 t_4 \right).$$

Um nun die mittlere Stromstärke i_m zu finden, die während der Stundenzahl

$$t = t_1 + t_2 + t_3 + t_4$$

im Jahre den gleichen Energieverlust bedingen würde, setzen wir

$$V = \frac{a k}{q} i_m^2 t$$

und erhalten

$$i_m = \frac{i \sqrt{\frac{t_1}{16} + \frac{t_2}{4} + \frac{9 t_3}{16} + t_4}}{t_1 + t_2 + t_3 + t_4}.$$

Dieser Werth für die mittlere Stromstärke i_m muss für die Berechnung des Leitungsquerschnittes eingeführt werden, damit die jährlichen Kosten für den Energieverlust und die Zinsen und Amortisation desjenigen Anlagekapitals gleich sind, das dem Gewicht des verlegten Kupfers proportional ist.

Um diese Berechnung zu erleichtern, giebt Forbes folgende Tabelle:

t_1	t_2	t_3	t_4	Reduktions- faktor
0	0	0	1	1,000
0	1	0	1	0,790
1	0	2	1	0,744
1	1	1	1	0,685
2	2	1	1	0,604
4	0	0	1	0,500

Die Zahlen der mit „Reduktionsfaktor“ überschriebenen Kolumne sind diejenigen, mit denen der wirtschaftlich günstigste Leitungsquerschnitt für die maximale Stromstärke multiplicirt werden muss, um den günstigsten Querschnitt für den Strom von veränderlicher Stärke zu erhalten. In unserem oben durchgeführten Beispiele finden wir einen Querschnitt von 0,775 qcm unter der Annahme, dass stets die maximale Stromstärke von 50 A m in den Leitern herrscht. Nehmen wir an, dass unsere Kraftübertragung jährlich 4000 Stunden im Betriebe sei, dass der Maximalstrom jedoch nur 1000 Stunden im Jahre fließt und dass die übrigen 3000 Stunden sich gleichmässig auf ein Viertel, die Hälfte und drei Viertel der maximalen Stromstärke vertheilen. In diesem Falle ist

$$t_1 = t_2 = t_3 = t_4 = 1,$$

und man ersieht aus der vierten Horizontalreihe der obigen Tabelle, dass der Leitungsquerschnitt auf 0,685 des Querschnitts für die maximale Stromstärke reducirt werden muss. Wir haben deshalb nicht einen Leiter von 0,775 qcm Querschnitt anzuwenden, sondern einen solchen von 0,531 qcm Querschnitt oder von etwa 8,2 mm Durchmesser.

Die im Leiter durch den Stromdurchgang erzeugte Wärme muss in demselben Masse, wie sie erzeugt wird, auch wieder abgeleitet werden, wenn man die Temperatur des Leiters auf einem bestimmten, aus Gründen der Betriebssicherheit gegebenen Betrage erhalten will. Eine übermäßige Temperaturzunahme ist aus drei Gründen zu verwerfen. Zuerst beschädigt dieselbe die Isolation, indem sie das Isolationsvermögen des Materials verringert und dasselbe so weich macht, dass der Leiter hindurchsinken kann. Dies ist ein sehr

wichtiger Punkt und sollte mit grösster Sorgfalt beachtet werden. Man hat vorgeschlagen die unterirdischen Kabel in eiserne Rinnen zu legen, die mit einer bituminösen, die Kabel völlig umhüllenden Masse ausgefüllt sind. Diese Anordnung würde in vorzüglicher Weise die Kabel trocken halten, aber sie hat den grossen Nachtheil, dass jede derartige Masse nicht als fester Körper, sondern eher als eine dicke Flüssigkeit zu betrachten ist. In den unterirdischen Kabeln wird nämlich stets eine gewisse Wärmemenge entwickelt; und in Folge dessen trägt die bituminöse Masse die Kabel nicht, sondern diese sinken nach gewisser Zeit auf den Boden der Rohre und geben zu Kurzschlüssen Veranlassung. Der zweite Grund, weshalb eine Temperaturzunahme zu vermeiden ist, besteht darin, dass zufolge der damit verbundenen Widerstandszunahme der Kabel auch ein vermehrter Energieverlust auftreten wird. Drittens hat eine übermässige Temperatursteigerung auch eine Feuergefahr für die Punkte im Gefolge, wo die Kabel an Gebäuden befestigt sind.

Es ist daher von grosser Wichtigkeit, gleich von vornherein zu bestimmen, welche Temperaturzunahme in jedem gegebenen Falle zu erwarten ist, und wenn dieselbe höher, als aus Sicherheitsgründen zulässig, befunden wird, muss für bessere Abführung der erzeugten Wärme gesorgt werden. Dies lässt sich im allgemeinen durch Vergrösserung der Oberfläche der Leiter erreichen. Haben wir einen kreisförmigen Leiter von 7 qcm Querschnitt und finden wir, dass derselbe beim Durchgang eines Stromes von 1000 Am zu warm wird, so theilen wir diesen Leiter in 10 getrennte Drähte, von denen jeder 0,7 qcm Querschnitt hat. Auf diese Weise haben wir den gesammten Betrag der in Wärme umgesetzten Energie nicht verändert, aber wir haben die Oberfläche, die unter dem abkühlenden Einflusse der umgebenden Luft steht, im Verhältnis von $1 : \sqrt{10}$ vergrössert, und deshalb können die zehn dünnen Drähte mehr als dreimal soviel Wärme abgeben, wie der einzelne dicke Draht. Forbes hat eine auf Seite 174 wiedergegebene Tafel aufgestellt, aus der sofort ersichtlich ist, mit welcher Stromstärke ein Draht belastet werden kann, wenn die Temperatur in demselben sich bis zu 9° oder bis zu 26° über die der umgebenden Luft erheben darf.

Tafel über Erwärmung von Drähten.

Durchmesser in mm	Querschnitt in qmm	Gewicht von 100 m in kg	Widerstand von 100 m in Ohm	Die Temperatur steigt über die der Umgebung			
				um 9° C, wenn		um 26° C, wenn	
				Stromstärke in Am	Spannungs- verlust auf 100 m in Volt	Stromstärke in Am	Spannungs- verlust auf 100 m in Volt
56,4	2500	2225	0,000664	1475	0,98	2430	1,61
50,5	2000	1780	0,000830	1255	1,04	2045	1,69
43,7	1500	1335	0,00111	1020	1,13	1640	1,82
35,7	1000	890	0,00166	759	1,26	1215	2,02
29,9	700	641	0,00236	575	1,33	930	2,20
25,2	500	445	0,00332	447	1,48	702	2,33
19,5	300	267	0,00553	305	1,69	493	2,72
17,9	250	222	0,00664	265	1,76	432	2,87
16,0	200	178	0,00830	224	1,86	364	3,02
13,84	150	134	0,0111	183	2,08	292	3,24
11,29	100	89	0,0166	134	2,22	216	3,59
10,70	90	80,1	0,0184	124	2,28	201	3,70
10,02	80	71,2	0,0208	113	2,35	182,3	3,79
9,44	70	62,3	0,0236	101,8	2,40	165,8	3,91
8,74	60	53,4	0,0277	90,8	2,46	148,1	4,10
7,98	50	44,5	0,0332	79,2	2,63	129,0	4,28
7,14	40	35,6	0,0415	66,8	2,77	108,7	4,51
6,18	30	26,7	0,0553	54,2	3,00	86,0	4,76
5,64	25	22,3	0,0664	47,3	3,14	76,5	5,08
5,05	20	17,8	0,0830	40,0	3,32	65,0	5,40
4,37	15	13,4	0,111	31,9	3,54	52,0	5,77
3,57	10	8,9	0,166	23,7	3,93	38,4	6,37
3,39	9	8,01	0,184	22,0	4,05	35,5	6,47
3,19	8	7,12	0,208	20,1	4,18	32,5	6,76
2,99	7	6,23	0,236	18,2	4,30	29,6	6,99
2,76	6	5,34	0,277	16,1	4,46	26,3	7,29
2,52	5	4,45	0,332	14,0	4,65	22,8	7,57
2,26	4	3,56	0,415	11,9	4,94	19,2	7,97
1,95	3	2,67	0,553	9,61	5,31	15,6	8,63
1,79	2,5	2,23	0,664	8,43	5,60	13,6	9,03
1,60	2,0	1,78	0,830	7,18	5,96	11,5	9,55
1,38	1,5	1,34	1,11	5,75	6,39	9,23	10,25
1,13	1,0	0,89	1,66	4,23	7,02	6,91	11,47
0,78	0,5	0,45	3,32	2,50	8,30	4,02	13,34

Kapitel VIII.

Leitungen für elektrische Kraftübertragung. — Leitungen für elektrische Kraftvertheilung. — Einfluss der Isolation bei verschiedenen Spannungen. — Luftleitungen. — Isolatoren. — Befestigung der Leitungen an den Isolatoren. — Verbindungen. — Material für Luftleitungen. — Kostenanschlag für eine Luftleitung. — Blitzableiter. — Unterirdische Leitungen. — Edisonsche Kabel. — Das Dreileitersystem. — Verschiedene Systeme für unterirdische Leitungen. — Siemens'sche Bleikabel.

Die Frage, ob die Leitungen oberirdisch geführt oder in die Erde verlegt werden sollen, hängt von einer Reihe lokaler Bedingungen ab. Aber in der Regel wird es wirtschaftlich günstiger und hinreichend betriebssicher sein, für die eigentliche Uebertragung der Energie Luftleitungen zu benutzen, während für ihre Vertheilung in die Erde verlegte Kabel vorzuziehen und in einigen Fällen sogar unumgänglich nothwendig sind. Es wird eine Zeit kommen, und in Amerika ist sie bereits gekommen, wo man das Netz der oberirdischen Telegraphen- und Telephonleitungen in den Städten nicht mehr durch neue Drähte vermehren darf, und am wenigsten durch solche, die grosse Energiemengen fortleiten. Die Gesellschaften für elektrische Beleuchtungs- und Kraftübertragung haben mit dieser Sachlage von Anfang an gerechnet und deshalb, wenn sie mit Entwürfen für eine Centralanlage hervortraten, ihre Leitungsnetze unter die Erde verlegt. Die Sache ändert sich, wenn es sich um eine elektrische Kraftübertragung auf weite Entfernungen, wohlmöglich über Land handelt. Hier kann man die Gefahr des Zerreißens einer Luftleitung fast gänzlich ausschliessen, indem man die Träger in kleinen Entfernungen von einander anbringt — eine Vorsichtsmassregel, die in Städten, wo die Breite der Strassen und Plätze häufig grosse Spannungen zwischen den einzelnen Trägern nöthig macht, nicht immer getroffen werden kann; sollte dennoch ein Draht zerreißen, so

ist die Gefahr, dass jemand verletzt wird, sehr viel kleiner als in den belebten Strassen der Stadt. Wir haben bereits gesehen, dass eine Kraftübertragung auf grosse Entfernungen nur mit Verwendung hoher Spannungen möglich ist, und deshalb ist gerade die Isolation der Leitung ein Gegenstand von höchster Wichtigkeit. Wenn bei der Stromversorgung eines Stadttheiles bei einer Spannung von 100 V auch einige Ampère verloren gehen — nach den Versuchen

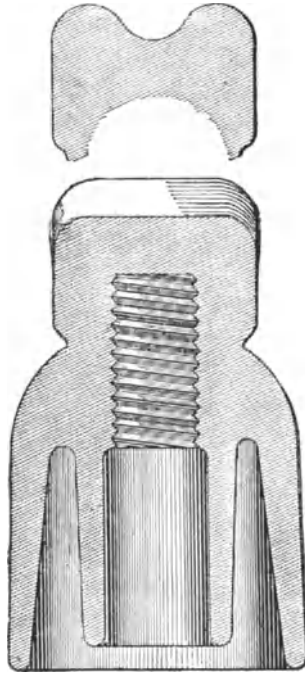


Fig. 73.

von Edison in der Centralstation von New-York scheint dies gelegentlich vorzukommen — so ist ein derartiger Verlust bei den gewaltigen Strömen, die von der Station ausgehen, sehr unbedeutend. Aber wenn ein gleicher Verlust in einem Stromkreis mit 2—3000 V Spannung auftreten würde, so könnte leicht der gesammte Strom auf diese Weise verloren gehen, und der Motor würde überhaupt keine Arbeit leisten können. Bei einer Luftleitung treten derartige Mängel in der Isolation weniger leicht auf und können, wenn sie auftreten, leichter gefunden und fortgeschafft

werden, als bei irgend einem der unterirdisch verlegten Systeme, deren praktische Verwendbarkeit für höhere Spannungen bislang noch nicht hinreichend erprobt ist. Aus diesem Grunde geht man sicherer, wenn man für die Uebertragung auf weite Entfernungen bei hoher Spannung Luftleitungen und für die Vertheilung elektrischer Energie bei niedriger Spannung unterirdische Leitungen verwendet.

Luftleitungen.

Der Leiter ist meistens ein blanker Draht oder ein Kabel aus Kupfer, Eisen, Phosphor- oder Silicium-Bronze; jedoch werden auch manchmal schwach isolirte Leiter verwendet. Die Isolation schützt einigermassen vor Kurzschlüssen, die durch andere Drähte, Baum-

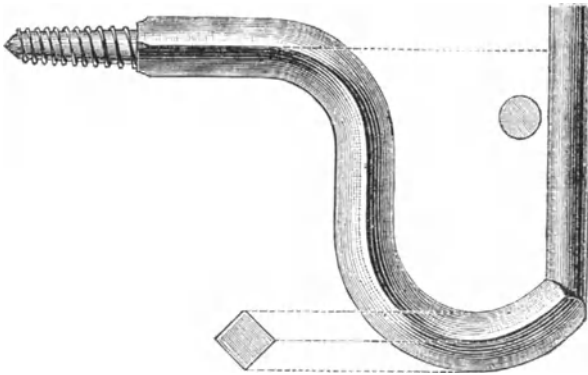


Fig. 74.

zweige oder andere auf die Drähte fallende Körper verursacht werden könnten, und hat weiter den Vortheil, die Abkühlungsfläche zu vergrößern und so die Temperatur des Drahtes zu erniedrigen. Auf den ersten Blick könnte man überrascht sein, dass ein mit isolirendem, also auch die Wärme schlecht leitendem Material umhüllter Draht weniger erwärmt werden soll, als ein blanker. Aber diese Thatsache ist durch Versuche nachgewiesen und beruht darauf, dass ruhige Luft der denkbar schlechteste Wärmeleiter ist, während das Isolationsmaterial im Vergleich mit den Metallen allerdings die Wärme schlecht leitet, im Vergleich mit Luft aber gut. Ist der Draht dem Winde ausgesetzt, dann führt die Luft, wenn sie auch schlecht leitet, die Wärme gut ab, da jedes Lufttheilchen, das durch Berührung mit dem Draht erwärmt ist, sofort weggeführt und durch ein neues und kaltes ersetzt wird;

in diesem Falle hat der umspinnene Draht keinen Vortheil vor dem blanken.

Der Leiter wird wie die Telegraphendrähte von Porzellanisolatoren getragen, die, um einen hohen Isolationswiderstand zu erhalten, vom Typus der Doppelglocken (Fig. 73) oder sogenannte Flüssigkeitsisolatoren sein sollten. Bei letzteren ist die innere Glocke zu einer mit Oel gefüllten Schale ausgebildet, um einen Stromverlust längs der Oberfläche zu verhindern. Die Bruchfläche des Materials soll gleich-

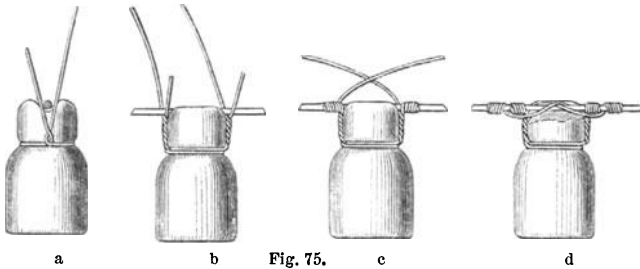


Fig. 75.

förmig fein, dicht gekörnt und frei von Poren und Blasen sein; die Glocken müssen vollständig weiss aussehen und keine Risse und Sprünge zeigen. Die Glasur muss gleichfalls schön weiss sein und die gesammte innere und äussere Oberfläche bedecken. Das Gewinde muss eben und gut ausgeprägt sein und darf keine zerbrochenen Stellen enthalten. Der Träger ist anfangs rund und später eckig.

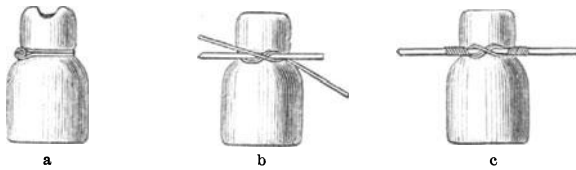


Fig. 76.

Er wird mit Garn, das mit Leinöl getränkt ist, umwickelt und dann in das Gewinde eingeschraubt, oder er kann auch mit Schwefel eingekittet werden. Um den Isolator elektrisch zu prüfen, wird er aufrecht hingestellt; 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 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. 75 u. 76 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



Fig. 77.

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



Fig. 78.

anderen Metalle als dasjenige der Leiter zu verwenden, um elektrolytische Vorgänge zu vermeiden. Die Verwendung von Loth ist 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 verschie-



Fig. 79.

dener Metalle. Zwischen dünnen Drähten kann man eine feste Verbindung in der Weise, wie es Fig. 77 zeigt, herstellen. Um den Kontakt zu verbessern, wird der mittlere Theil verlöthet. Fig. 78 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 mittleren Theil bis zu ihrer Berührung herumgewickelt werden können; dann werden sie miteinander verflochten, wie es Fig. 79 zeigt.

Wenn die Drähte so dick sind, dass sie nicht mehr um einander gewickelt werden können, so wird zuweilen die Fig. 80 dargestellte Verbindungsweise angewandt. Die beiden Drahtenden werden kurz rechtwinkelig umgebogen und dann so neben einandergelegt, 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 umwickelt werden. Wenn der Raum zwischen den beiden Enden



Fig. 80.

vollkommen mit Bindedraht ausgefüllt ist, wird die ganze Stelle verlöthet.

Kabel werden mit einander verbunden, indem man entweder die einzelnen Adern verbindet oder besondere Verbindungsstücke anwendet. Ein solches ist kürzlich von Lazare Weiller in sehr zweck-



Fig. 81.

mässiger Form eingeführt; es besteht aus einem hohlen Doppel-Konus mit einer Oeffnung in der Mitte. 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



Fig. 81 a.

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. 81a giebt einen Querschnitt der Verbindungsstelle; die Kabel befinden sich in ihrer endgültigen Lage. Als eine zweckmässige Zusammensetzung für das Loth empfiehlt Lazare Weiller zwei Theile Zinn und ein Theil Blei. Die Kabeldrähte und Verbindungsstücke

sind beide aus Silicium-Bronce hergestellt, wodurch eine elektrolytische Wirkung ausgeschlossen ist.

Material für Luftleitungen.

Wir haben bei dem Material für Luftleitungen zwei Erfordernisse zu berücksichtigen, die bis zu einem gewissen Grade einander entgegenwirken. Der specifische Widerstand des Materials soll sehr niedrig sein, seine Bruchfestigkeit dagegen recht hoch. Kupfer hat nun von allen praktisch verwendbaren Metallen den geringsten Widerstand, aber seine Bruchfestigkeit ist verhältnismässig niedrig. Die Träger müssen daher in sehr kurzen Zwischenräumen aufgestellt werden, und es muss ein beträchtlicher Durchhang zugelassen werden, damit keine zu grossen Spannungen auftreten. Der erste Umstand erhöht die Kosten der Anlage, der zweite vergrössert die Gefahr, dass der Draht mit benachbarten Gegenständen in Berührung kommt, wenn er vom Winde hin und her bewegt wird. Eisen, besonders Stahl, bietet in dieser Beziehung Vortheile, aber der Nachtheil liegt wieder darin, dass es ein schlechter Leiter für Electricität ist. Die Leitungsfähigkeit von Schmiedeeisen beträgt nur 17% von derjenigen des reinen Kupfers, und diejenige von Gussstahl nur 10%. Wenn Gussstahl für die Leitungen benutzt wird, muss daher das Gesamtgewicht, welches von den Isolatoren zu tragen ist, etwa neun- bis zehnmal grösser sein, als dasjenige eines Kupferdrahtes von gleichem Widerstande; wenn nun auch die Träger in grösserer Entfernung von einander stehen können, so müssen doch die einzelnen kräftiger sein, als sie bei Kupferleitungen zu sein brauchten. Man erspart daher nichts bei der Benutzung von festerem Material. Als Aushilfsmittel bei dieser Schwierigkeit ist vorgeschlagen worden, Stahldraht zu benutzen, der mit einer Schicht elektrolytisch niedergeschlagenen Kupfers bedeckt ist. Man hoffte, auf diese Weise einen Leiter zu erhalten, der die Bruchfestigkeit des Stahls und das hohe Leitungsvermögen des Kupfers in sich vereinigen würde. Diese Erwartung wurde jedoch nicht erfüllt, und der „Compounddraht“ ist niemals sehr in Gebrauch gekommen. Der Grund hierfür liegt nicht fern. Der beste Stahl hat etwa dreimal grössere Zugfestigkeit als Kupfer, und reines Kupfer hat etwa neun mal grössere Leitungsfähigkeit als Stahl. Denkt man sich nun einen Draht, der aus gleichen Theilen Kupfer und Stahl besteht, so ist seine Bruchfestigkeit unter der Annahme, dass das elektrolytisch niedergeschlagene Kupfer

den vollen Antheil am Zuge übernimmt, $\frac{1}{2} + \frac{1}{6}$, das ist 66% derjenigen eines Stahldrahts von gleichem Durchmesser. Das Gewicht würde in Anbetracht des höheren specifischen Gewichtes des Kupfers, um 5% grösser sein. Die Leitungsfähigkeit des Drahtes würde zweimal grösser sein, als bei Stahldraht von gleichem Durchmesser, oder sie würde nur 66% von derjenigen des reinen Kupfers betragen. Wir haben also folgende Beziehungen:

Drahtsorte	Bruchfestigkeit in $\frac{\text{kg}}{\text{qmm}}$	Leitungsfähigkeit
Reiner Kupferdraht	25,3	100
Stahldraht	83,8	10
Kompounddraht	54,9	66

Wenn wir die Güte des Drahtes durch das Produkt seiner Bruchfestigkeit und seiner Leitungsfähigkeit ausdrücken, so ist der Compounddraht nur um 30 % besser als der Kupferdraht, und in der Praxis wird dieser scheinbare Vortheil zum grossen Theil durch die vergrösserten Kosten der Herstellung aufgehoben. Seit der Erfindung des Compounddrahtes ist man in der Herstellung gewisser Legirungen, die grosse Zugfestigkeit mit ziemlich guter Leitungsfähigkeit verbinden, bedeutend weiter gekommen.

Die erste dieser Legirungen war eine Phosphorbronce von $70 \frac{\text{kg}}{\text{qmm}}$ Zugfestigkeit und 26% Leitungsfähigkeit. Später führte Lazare Weiller seine Siliciumbronce ein, deren Leitungsfähigkeit 97% von derjenigen des reinen Kupfers und deren Bruchfestigkeit halb so gross ist, wie diejenige des besten Stahls. Ausserdem verfertigt er für Zwecke der elektrischen Kraftübertragung und Beleuchtung Silicium-Kupferdrähte, deren Leitungsfähigkeit nach seinen Angaben zwischen derjenigen des Kupfers und Silbers liegt; über die Bruchfestigkeit dieses Materials fehlen die Angaben¹⁾. Die folgende Tabelle, die dem Buche von Grief entnommen ist, enthält Zahlen über das Gewicht und den Widerstand dieses Drahtes.

¹⁾ J. B. Grief, Silicium-Bronce-Leitungen. Wien, Seidel & Sohn.

Siliciumbroncedraht.

Durchmesser in mm	Gewicht pro km in kg	Widerstand pro km in Ohm	Durchmesser in mm	Gewicht pro km in kg	Widerstand pro km in Ohm
0,30	0,63	236,0	2,25	85,4	4,05
0,40	1,12	132,0	2,50	43,8	3,40
0,50	1,75	85,1	2,75	52,9	2,70
0,60	2,52	59,0	3,00	63,0	2,36
0,70	3,43	43,3	3,25	73,6	2,01
0,80	4,48	33,0	3,50	85,8	1,73
0,90	5,67	27,3	3,75	98,4	1,51
1,00	7,0	21,3	4,00	112,0	1,32
1,20	10,1	14,8	4,25	126,4	1,14
1,25	11,0	13,6	4,50	141,8	1,01
1,50	15,8	9,45	4,75	157,9	0,91
1,75	21,4	6,92	5,00	175,0	0,85
2,00	28,0	5,31			

Die folgende Tabelle giebt die Beziehung zwischen Bruchfestigkeit in $\frac{\text{kg}}{\text{qmm}}$ und Leitungsfähigkeit für die verschiedenen Materialien:

Leitungsmaterial	Bruchfestigkeit	Leitungsfähigkeit
Reines Kupfer	28	100
Phosphor-Bronce	72	26
Silicium-Bronce, Marke A . .	45	97
„ „ „ B	56,5	80
Schwedisches Hammer-Eisen .	36	16,5
Schwedischer Bessemer-Stahl .	40	16
Siemens-Martin-Fluss-Eisen . .	42	13,3
Patent-Guss-Stahl	95	10,5.

Die Wahl des Materials für eine Luftleitung hängt von einer Anzahl örtlicher Bedingungen ab. Im allgemeinen gebührt dem Kupfer der Vorzug vor Eisen und Stahl, und der Phosphor- oder Siliciumbronce der Vorzug vor reinem Kupfer. Um zu zeigen, welche Ersparnisse man durch Benutzung des letzteren Materials anstatt Eisens am Anlagekapital machen kann, theilt Grief in dem oben erwähnten Buche einige vergleichende Kostenanschläge für eine Telegraphenlinie von 1000 km Länge mit. Wenn für den Zweck einer elektrischen Kraftanlage die Länge der Leitung auch zu gross und der benutzte Draht auch zu dünn gewählt ist, so haben

diese Kostenanschläge doch den praktischen Werth, dass sie ein gutes Mittel zum Vergleiche der beiden Materialien darbieten, und sind aus diesem Grunde hier mitgetheilt. Der Leser kann aus den Tabellen entnehmen, wie Kostenanschläge für Luftleitungen gemacht werden und welchen Theil der Gesamtkosten die einzelnen Posten bilden. Es zeigt sich, dass die Kosten des Drahtes selbst die Gesamtkosten nicht sehr beeinflussen. Obgleich Siliciumbroncedraht etwa zweimal so theuer als ein gleichwerthiger Eisendraht ist, so wird doch durch Anwendung des ersteren eine Ersparniss am Anlagekapital gemacht. Es sind in diesem Falle weniger und schwächere Träger erforderlich; die Kosten für Transport und Arbeit werden dadurch niedriger, und auch die Unterhaltung billiger.

Erster Kostenanschlag.

Verzinnter Eisendraht von 5 mm Durchmesser.

Draht, 156000 kg, 304 M. für 1000 kg	47 424 M.
Transport des Drahtes, 16 M. für 1000 kg	2 496 „
Stützen und Isolatoren, 15000 Stück zu 1,60 M.	24 000 „
Anbringen der Isolatoren, Auflegen und Spannen des Drahtes, 8 M für 1 km	8 000 „
25 Träger (5 einfache, 10 doppelte) auf 1 km zu 9,60 M.	240 000 „
Transport der Träger, Stück zu 0,80 M.	20 000 „
Aufstellung der Träger, Stück zu 1,60 M.	40 000 „
Verbindung der Doppelträger, das Paar zu 1,60	16 000 „
	397 920 M.

Zweiter Kostenanschlag.

Siliciumbroncedraht von 2 mm Durchmesser.

Draht 28000 kg, zu 3,20 M. für 1 kg	89 600 M.
Transport, 16 M. für 1000 kg	448 „
Stützen und Isolatoren, 12000 Stück zu 0,80 M.	9 600 „
Anbringen der Isolatoren, Auflegen und Spannen des Drahtes, 3,20 M. für 1 kg	3 200 „
16 Träger (8 einfache, 4 doppelte) auf 1 km zu 8 M.	128 000 „
Transport der Träger, Stück zu 0,80 M.	12 800 „
Aufstellung der Träger, Stück 1,60 M.	25 600 „
Verbindung der Doppelträger das Paar zu 1,60 M.	6 400 „
	275 648 M.

Man sieht, dass die gesammte Ersparniss zu Gunsten des theueren Siliciumbroncedrahts sehr beträchtlich ist. Man muss ferner dabei

bedenken, dass dieser Draht von Witterungseinflüssen so gut wie gar nicht angegriffen wird, also immer seinen vollen Materialwerth beibehält, während der gleichwerthige Eisendraht durch Verrosten werthlos wird.

Blitzableiter.

Luftleitungen sind, ob sie nun zu Zwecken der elektrischen Beleuchtung oder Kraftübertragung benutzt werden, Blitzschlägen ausgesetzt, die nicht nur die Drähte, sondern auch die mit den Enden derselben verbundenen Dynamomaschinen und Motoren zerstören können. Um die Anlage hiergegen zu schützen, wendet man

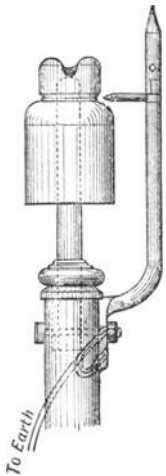


Fig. 82.

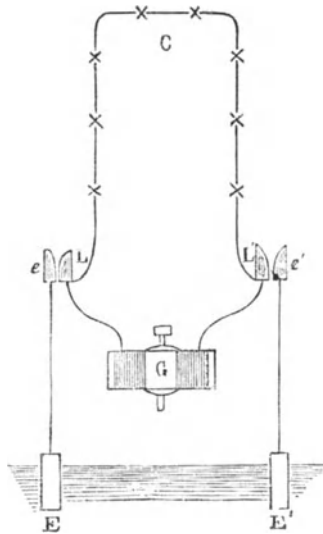


Fig. 83.

verschiedene Vorrichtungen an, die alle mehr oder weniger Modifikationen der in der Telegraphentechnik gebräuchlichen Blitzableiter sind und auf dem Principe beruhen, dass eine Entladung der atmosphärischen Elektrizität die kurze Unterbrechung einer Erdleitung überspringt, während der Arbeitsstrom diesen Weg nicht nehmen kann. Fig. 82 stellt einen Blitzableiter für die Leitung dar. Die vertikale Spitze wirkt wie eine gewöhnliche Auffangstange, indem sie die Möglichkeit, dass die Leitung getroffen werden kann, verringert.

Fig. 83 und 84 entstammen der Zeitschrift „Electrical Review“.

Sollte dies trotzdem zwischen zwei Blitzableitern geschehen, so wird der Strom in der Leitung verlaufen, aber bei der nächsten horizontalen Spitze überspringen und so zur Erde abgeleitet werden, ehe er die Maschinen am Ende der Linie beschädigen kann. Eine andere demselben Zwecke dienende Anordnung hat Elisha Thomson bei seinem System der Bogenlichtbeleuchtung auf weite Entfernungen angewandt. Dieselbe ist natürlich ebensogut für lange Leitungen anwendbar, die dem Zwecke der elektrischen Kraftübertragung die-

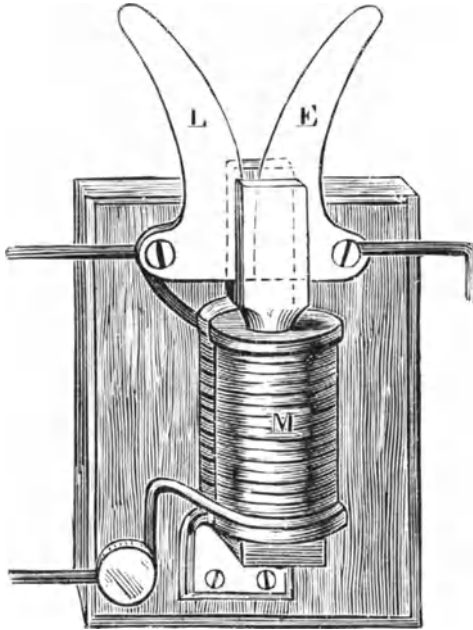


Fig. 84.

nen. Dieser Blitzableiter, Fig. 83, gestattet für Hin- und Rückleitung eine Entladung zur Erde und ausserdem unterbricht er automatisch jeden Kurzschluss der Leitungen, der durch einen Blitzschlag entstehen könnte. Bekanntlich benutzt das Thomson-Houstonsche System sehr hohe Spannung (bis 2000 V); dieselbe würde daher hoch genug sein, um den Lichtbogen, der sich zwischen den Metalltheilen des Blitzableiters bildet, auch nach Durchgang des vom Blitzschlage herrührenden Stromes zu erhalten. Dies würde nicht allein zu einer Zerstörung des Blitzableiters, sondern auch zur Verbrennung der Dynamomaschine führen. Um dies zu verhindern

ist eine Vorrichtung angebracht, die den Lichtbogen unterbricht. In Fig. 83 stellt G die auf die Leitung C arbeitende Dynamomaschine vor; L und L¹ sind Metallplatten, die mit der Leitung verbunden sind, e und e¹ sind ähnliche Platten, die bei E und E¹ an Erde liegen. Zwischen e und L und ebenso zwischen e¹ und L¹ liegt ein kleiner Zwischenraum, der von einer Blitzentladung leicht übersprungen werden kann. Dieselbe wird auf diese Weise zur Erde abgeleitet. Um den entstehenden Lichtbogen zu unterbrechen, wird der Fig. 84 abgebildete Magnet benutzt. Die Platten L und e nähern sich einander nur an ihrem unteren Theile, oben entfernen sie sich von einander, wie man sieht. Der Magnet, dessen Pole abgeflacht sind, treibt nun den Lichtbogen, der sich zwischen L und e gebildet haben mag, nach oben. Der Lichtbogen wird auf diese Weise erheblich verlängert und schliesslich unterbrochen.

Unterirdische Leitungen.

Eine grosse Anzahl verschiedener Systeme für unterirdische Kabel sind entweder vorgeschlagen oder versucht, ohne dass man bislang sagen könnte, dass eins derselben sich endgültig bewährt hätte. Die Leitungen boten und bieten noch die grössten Schwierigkeiten bei der Vertheilung der Elektrizität. Edison war einer der ersten, der sich mit diesem Probleme beschäftigte, und wenn er es auch nicht völlig gelöst hat, so gebührt ihm doch das Verdienst, etwas Brauchbares geschaffen zu haben. Er brachte zwei halbrunde Leiter in eisernen Röhren unter; der Raum zwischen den Leitern selbst und zwischen ihnen und der Röhre war mit einer bituminösen Masse ausgefüllt, die eingegossen wurde, nachdem sie durch Erhitzung flüssig gemacht war. Die Leitungen wurden in Stücken von 6 m Länge hergestellt; an den Enden ragten die Kupferstangen zum Zwecke der Verbindung hervor. Die Verbindungen wurden durch Löthen hergestellt und erforderten eine sehr mühsame Arbeit, weil die dicken Kupferstangen fast die ganze zum Löthen nöthige Hitze fortleiteten. Um diese Arbeit zu verringern, wäre es vortheilhaft gewesen, längere Rohre anzuwenden, aber dies war nicht möglich, da die Strassen New-Yorks, wie in allen grossen Städten, durch Gas-, Wasser- und Abzugsröhren so durchschnitten sind, dass man nirgends über eine gerade Linie von einiger Länge verfügen kann. Ueber jede Löthstelle wurde zur Verbindung der Eisenröhre eine kurze Muffe geschoben. Bald nach Beendigung der Verlegung

begannen die Störungen. Ungleichmässigkeiten des Untergrundes und Spannungen, die von dem Verkehr schwerer Wagen auf den Strassen herrührten, waren die Veranlassung zu Verbiegungen und Brüchen der Rohre. Diese hatten alsdann Spannungen in den Leitern im Gefolge; die Kupferstangen sanken durch die bituminöse Masse hindurch, bis sie sich berührten und Kurzschlüsse bildeten. Auch wurden die Rohre oft durch die Werkzeuge von Arbeitern beschädigt, die mit Gas-, Wasser- oder Kanalisationsarbeiten beschäftigt waren. So wechselte man die leichten schmiedeeisernen Rohre, die anfänglich benutzt waren, allmählich gegen starke gusseiserne Rohre aus, die nicht leicht durch eine Spitzhacke verletzt werden konnten. Dem ganzen System wurde eine grössere Biegsamkeit gegeben, indem man die starren Verbindungsmuffen mit Kugelgelenken versah, welche den Leitungen gestatteteten, dem etwa stattfindenden Sinken des Untergrundes besser zu folgen. Bevor



Fig. 85.

die Kupferstangen in die Rohre eingesetzt wurden, umwand man sie einzeln mit Isolirband, das wiederum durch Stricke zusammengehalten wurde. Dann wurden sie mit ihren flachen Seiten an einander gelegt und nochmals gemeinsam mit Stricken umwunden. Hierdurch verhinderte man, dass sie bei einem etwaigen Nachgeben der Isolirmasse unter einander oder mit den Rohren in Berührung kamen. Wo eine Krümmung in der Leitung nöthig war, wurden gusseiserne gebogene Verbindungsmuffen, wie Fig. 85 sie zeigt, angewendet.

Man kann unmöglich von unterirdischen Leitungen sprechen, ohne das sogenannte Dreileitersystem zu erwähnen. Es ist bereits auseinandergesetzt, dass eine allen Anforderungen genügende elektrische Vertheilung, die Unabhängigkeit eines Motors von dem anderen gewährleisten muss; dies lässt sich am besten durch Konstanthaltung der Spannung in den Hauptleitungen erreichen, wenn sich auch die Stromentnahme in den verschiedenen Theilen des Systems und zu verschiedenen Zeiten ändert. Haben wir nun ein einzelnes Paar von

Kabeln, von denen das eine mit dem positiven, das andere mit dem negativen Pole der Maschine verbunden ist, so wird je nach der Grösse des Widerstandes dieser Kabel ein bestimmter Spannungsverlust in denselben stattfinden, der um so grösser ausfällt, je grösser der Stromverbrauch ist, oder je mehr Motoren zu gleicher Zeit aus denselben Hauptleitungen gespeist werden. Wenn man nur Motoren berücksichtigt, so würde die geringe Spannungsänderung nicht von grosser Bedeutung sein; aber da gewöhnlich elektrische Lampen von denselben Leitungen gespeist werden, muss man die Spannung so konstant wie möglich halten. Dies lässt sich durch Anwendung eines Leiters erreichen, dessen Querschnitt im Vergleiche zum Maximum des ihn durchfliessenden Stromes gross ist. Wir haben jedoch bereits gesehen, dass der Leitungsquerschnitt durch Betrachtungen über den wirthschaftlichen Betrieb der Anlage gegeben ist, und dass jede übermässige Vergrösserung des Kupfergewichts der Leitungen aus ökonomischen Gründen ausgeschlossen ist. Die absolute Aenderung der Spannung ist deshalb für jede Entfernung vom Generator und für jede Tageszeit eine bestimmte Grösse, deren Einfluss wir nur durch Anwendung möglichst hoher Spannung verringern können. Eine Veränderung um 5 V nach oben und nach unten ist für eine normale Spannung von 50 V bedenklich, da sie einer Differenz von 20% zwischen der höchsten und niedrigsten Spannung entspricht; aber wenn wir die normale Spannung auf 200 V erhöhen können, so erhalten wir nur eine Differenz von 5%, die in der Praxis schon zulässig ist. Die gewöhnlichen Glühlampen werden nun für 100 V verfertigt, und, wenn wir die Leitungen zur gleichzeitigen Speisung von Lampen und Motoren benutzen wollen, so müssen wir eine Spannung von 100 V zwischen ihnen halten. Wenn man brauchbare Lampen für 200 V konstruiren könnte, würde man das Gewicht der Leitungen auf ein Viertel des zum Betriebe bei 100 V nöthigen beschränken können; aber da es brauchbare Lampen für diese Spannung zur Zeit noch nicht giebt, müssen wir nach einem Mittel aussehen, das uns in den Stand setzt, Lampen von 100 V zu benutzen, dabei aber Strom von 200 V Spannung zu erzeugen. Diese Anforderung erfüllt das Dreileitersystem. In diesem System bedient man sich zweier Dynamomaschinen, die auf folgende Weise geschaltet sind. Der negative Pol der ersten Dynamomaschine liegt an der negativen Leitung; der positive Pol derselben Maschine an dem negativen Pole der zweiten Maschine und an einem Drahte, welcher der Ausgleichs-

draht genannt wird; der positive Pol der zweiten Dynamomaschine liegt an der positiven Leitung. Die Lampen und Motoren liegen möglichst zu gleichen Theilen zwischen der negativen Leitung und dem Ausgleichsdrahte und zwischen diesem und der positiven Leitung. Wenn alle Lampen und Motoren eingeschaltet sind, fliesst kein Strom durch den Ausgleichsdraht zu den Maschinen; aber wenn einige der Motoren oder Lampen auf der einen oder anderen Seite des Ausgleichsdrahtes ausgeschaltet werden, fliesst ein Strom durch diesen Draht von oder nach der Dynamomaschine, die zur Zeit den grösseren Theil der Arbeit leistet. Da es höchst unwahrscheinlich ist, dass alle Lampen oder Motoren auf der einen Seite des Ausgleichsdrahtes gleichzeitig ausgeschaltet sein werden, so kann derselbe beträchtlich dünner gewählt werden als die Hauptleitungen; die Hälfte des Querschnitts der letzteren dürfte für die Praxis genügen. In diesem Falle steht das Kupfergewicht der Leitungen für das Dreileitersystem mit 200 V Spannung zu dem für das Zweileitersystem mit 200 V erforderlichen in folgender Beziehung. Da jede Hauptleitung nur von der Hälfte des Stromes durchflossen wird, braucht sie nur den halben Querschnitt zu haben; der Ausgleichsdraht wird höchstens von einem Viertel des Stromes durchflossen, für ihn ist also nur ein Viertel des Gewichtes nöthig. Das gesammte Kupfergewicht für das Dreileitersystem ist also $\frac{1}{2} + \frac{1}{2} + \frac{1}{4}$, für das Zweileitersystem $1 + 1$; im ersteren Falle erzielt man also eine Kupferersparniss von 37%. Diese Berechnung ist unter der Voraussetzung gemacht, dass in jedem Falle der Leitungsquerschnitt nach dem Thomsonschen Gesetze bestimmt ist. Um die Aenderungen in der Spannung einzuschränken, muss bisweilen der Leitungsquerschnitt grösser genommen werden, als er sich nach diesem Gesetze ergibt; da aber die erhöhte Spannung eine grössere absolute Aenderung derselben zulässig macht, kann die durch Anwendung des Dreileitersystems erzielte Ersparniss grösser sein als hier angenommen wurde. Die Edison-Gesellschaft berechnet die Ersparniss auf 60%. Edison hat vorgeschlagen, den Querschnitt des mittleren Leiters noch weiter zu verringern, indem man bei jedem Stromabnehmer einen Umschalter anbringt, vermöge dessen die Lampen oder Motoren in jede der beiden Hälften des Netzes eingeschaltet werden können. Die Konsumenten werden ihren Umschalter natürlich so einstellen, dass sie höhere Spannung haben, wenn etwa ein Unterschied wegen der ungleichen Stromvertheilung

stattfinden sollte. Auf diese Weise würden sie sich gegenseitig unterstützen, um die normale Spannung wiederherzustellen und so verhindern, dass durch den Ausgleichsdraht ein beträchtlicher Strom in der einen oder anderen Richtung fliesst. Als weitere Neuerung hat Forbes einen elektromagnetischen Apparat konstruiert, der den Umschalter automatisch an die eine oder die andere der Hauptleitungen legt, wenn ein bestimmter Unterschied in den Spannungen eintritt.

Die drei Leiter werden in schmiedeeiserne Röhren verlegt. Jeder Leiter ist mit einer Schicht von Isolirband umgeben und dann spiralförmig mit einem Seil umwickelt, das mit einer isolierenden, durch Erhitzung flüssig gemachten Masse imprägnirt ist. Die Steigung der Windungen ist gross im Vergleich zum Durchmesser des Seiles, sodass sich beim Verlegen der Leitungen in die Rohre

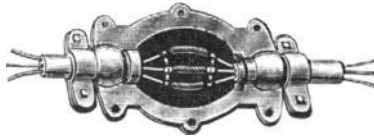


Fig. 86.

die Windungen des einen Leiters in die Zwischenräume des anderen eindrücken.

Die drei Leiter sind dann nochmals durch eine spiralförmige Wickelung mit Hanfseilen aneinandergebunden und dann in die Rohre hineingebettet. Schliesslich wird geschmolzene Isolationsmasse bei hoher Temperatur in die Rohre eingegossen; die Flüssigkeit läuft in den Spirallinien, welche durch die Windungen der Hanfseile gebildet werden, der ganzen Länge des Rohres nach hinunter.

Die Verbindungen zwischen den aufeinander folgenden Stücken dieser „elektrischen Rohre“ werden durch besondere Muffen mit Kugelgelenken, wie sie Fig. 86 zeigt, hergestellt. Anstatt die Enden der Leiter einfach aneinander zu löthen, werden kurze, biegsame Verbindungsstücke benutzt. Dieselben bestehen aus einem Stück Kabel, an dessen Enden passend geformte Stücke gelöthet oder gegossen sind; in diesen sind wieder Bohrungen angebracht, die zum Durchmesser der Kupferleitungen passen und in denen die letzteren beim Verlegen verlöthet werden. Drei solche Kabel sind für eine

gewöhnliche Verbindung nöthig. Eine anders geformte Verbindungsmuffe wird für den Anschluss von Zweigleitungen an die Hauptleitungen benutzt. Die Konstruktion derselben ist aus Fig. 87 ersichtlich, und zur Erklärung derselben genügen die über die gewöhnliche Verbindungsmuffe gemachten Angaben.

Wir haben hier noch eine andere, für dies System eigenthümliche Art der Verbindung zu erwähnen. Es ist dies der sogenannte „Sicherheits-Verbindungskasten“, der dazu dient, die Speiseleitungen mit bestimmten Punkten des Netzwerkes zu verbinden. Durch die Verwendung von Speiseleitungen erzielt man dasselbe Resultat, wie wenn der Generator, der ganz ausserhalb des zu versorgenden Distriktes aufgestellt sein kann, sich ganz im Centrum desselben befände. Wendet man eine genügende Anzahl von Speiseleitungen an und verbindet jede derselben mit einer besonderen Dynamo-

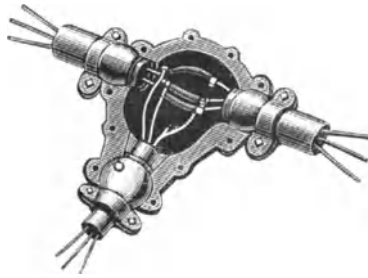


Fig. 87.

maschine, deren Klemmenspannung so regulirt werden kann, dass die Spannung an den Enden der Speiseleitungen konstant bleibt, so haben wir scheinbar jede Dynamomaschine nach ihrem Vertheilungscentrum verlegt, das heisst, in unmittelbare Nähe der Punkte gebracht, an denen die Stromabnahme stattfindet. Die Spannungsausgleichung ist auf diese Weise über das ganze mit Strom zu versorgende Gebiet sehr erleichtert. In der von Edison eingerichteten Anlage von New-York sind 20 getrennte Speiseleitungen vorgesehen. Der Sicherheits-Verbindungskasten ist ein grosses rundes Gehäuse, dessen oberer Theil in der Ebene des Strassenpflasters liegt. Er ist mit zwei Deckeln ausgerüstet, einem äusseren, der abnehmbar ist, und einem inneren, der mit dem Kasten wasserdicht verschraubt wird. Den mittleren Theil des Kastens nehmen drei Polstücke ein; dieselben entsprechen den drei Speiseleitungen und sind mit ihnen verbunden.

Die Polstücke sind Ringe aus Kanonenmetall, deren jeder soviel Vorsprünge hat, als Verzweigungsleitungen mit dem Kasten verbunden sind. Alle elektrischen Theile in dem Kasten sind voneinander und von dem Kasten isolirt. Die radialen Vorsprünge der Polstücke endigen in polirten, gold-plattirten Flächen von etwa 6 qcm, die symmetrisch um die Mitte des Kastens angeordnet sind und von ihm gleichen Abstand haben. Die Enden der Zweigleitungen sind ebenfalls in drei anderen Kreisen angeordnet, deren jeder in derselben Ebene mit dem entsprechenden Polring liegt; sie haben jedoch einen grösseren Durchmesser, als die zuerst beschriebenen. Die Sicherungen, die gleichfalls mit gold-plattirten Enden versehen sind, verbinden jedes Polstück mit dem Ende der gegenüberliegenden Zweigleitung. Die elektrischen Rohre, welche die Zweigleitungen enthalten, treten etwa 60 cm unter der Strassenfläche in den Kasten ein; die Einführungsstellen sind wasserdicht verschlossen. Wenn aus irgend einem Grunde, vielleicht wegen eines Kurz- oder Erdschlusses, die Stromstärke in einer der Zweigleitungen zu gross wird, so schmilzt die Sicherung, welche die Speise- und Zweigleitung verbindet, und der Strom ist so lange unterbrochen, bis der Schaden reparirt und eine neue Sicherung eingesetzt ist.

Ein anderes System, das auch bereits das erste Versuchsstadium hinter sich hat, wendet die American Sectional Underground-Company an. Es bezweckt die Anordnung von allen elektrischen Drähten für Telephonie, Telegraphie, Beleuchtung und Kraftübertragung in einem gemeinsamen Rohre, aber von einander durch Fächer getrennt. Solche Rohre wurden von rechteckigem Querschnitt (25 cm \times 40 cm) hergestellt; die Verlegungskosten für 1 km betragen 40 000 M. An jeder Strassenecke ist an diesem Rohre ein Mannloch angebracht, das einem oder mehreren Männern Platz genug gewährt, um die Drähte durch die Röhren zu ziehen und die nothwendigsten Verbindungen zu machen. In zweckentsprechenden Entfernungen sind ferner längs der Leitung Handlöcher angebracht, um die Drähte für die Hausanschlüsse fassen zu können. Die Verbindungen zwischen den Hausanschlüssen und den Zweigleitungen werden in dem nächsten Mannloche gemacht; dann werden die Hausdrähte in einem gesonderten Fache des Rohres, das eigens zu diesem Zwecke bestimmt ist, fortgeführt, bis die Handlöcher erreicht sind, wo sie herausgenommen und zu dem Hause hinübergeführt werden. Als besondere Eigenschaft dieses Systems wird hervorgehoben, dass

durch die Einfügung der Fächer die Telephondrähte durch die Beleuchtungs- und Kraftübertragungsdrähte nicht beeinflusst werden. Auf der anderen Seite erscheint es zweifelhaft, ob die Isolation der schweren Kabel unbeschädigt bleiben wird, wenn diese durch die Fächer hindurchgezogen sind. Um die Mannlöcher vor Wasser zu schützen, sind in ihnen Schächte angebracht, die mit den Strassenkanälen in Verbindung stehen; andere sind mit offenen Gittern versehen, durch welche Ausdünstungen und Niederschläge in den Röhren selbst verhindert werden.

In Amerika werden ferner vielfach die unterirdischen Leitungen von Brooks benutzt. Die Leiter sind hier in schmiedeeisernen Röhren verlegt, welche mit den nöthigen Verzweigungskasten, Handlöchern und Ausführungsrohren versehen sind. Um die Rohre vor Oxidation zu schützen, werden sie in hölzernen Rinnen verlegt und mit heissem Pech völlig umgossen. Die Leiter werden in Bündeln zusammenfasst und mit heissem Mineralöl durchtränkt, und dann auf 600 m Länge in die Röhren gezogen. Sodann wird ein dickes Mineralöl in die Leitungen getrieben, um jegliche Feuchtigkeit auszuschliessen und die Isolation zu erhöhen. Um die Wirksamkeit dieses Oels als Isolationsmittel zu zeigen, hat Brooks auf der Ausstellung von Philadelphia folgende Versuche vorgeführt. Zwei Drähte wurden an die Pole einer Holtzsehen Influenzmaschine angelegt und ihre Enden in das Oel getaucht. Sie waren so angeordnet, dass ihre Entfernung im Oele 0,6 cm und an der Oberfläche 4 cm betrug. Beim Drehen der Maschine sprang der Funken an der Oberfläche im 4 cm langen Luftzwischenraum über, in der Flüssigkeit jedoch nicht, obgleich hier die Entfernung viel geringer war.

In allen bislang beschriebenen Systemen ist die leitende Idee, den Leiter in erster Linie mit einer so guten und dicken Isolation zu versehen, dass keine Feuchtigkeit an das Metall des Leiters dringen und so einen Erdschluss verursachen kann. Die Continental Underground Cable Company zieht es dagegen vor, für ihre Leiter eine billige und dünne Isolation anzuwenden, aber sie bemüht sich, dieselben mit vollkommen trockener Druckluft zu umgeben. Zu diesem Zwecke stellt sie Kanäle aus Blöcken von Asphalt oder einem anderen für Feuchtigkeit undurchdringbaren Material her und versieht dieselben mit eisernen Trägern oder gusseisernen Rinnen von halbkreisförmigem Querschnitt, in welche diese leicht isolirten Leiter passen. Die Leiter werden mittelst Stricken

von einem Mannloch zu dem anderen gezogen. Die Stricke schleppt ein von einem kleinen Elektromotor getriebener Wagen durch die Röhren, auch leichtere Drähte werden durch ihn verlegt. Das ganze Kanalsystem soll möglichst luftdicht verschlossen sein und wird mit komprimierter Luft, die durch Berührung mit verschiedenen Chemikalien völlig getrocknet ist, gefüllt. An den Enden der Kanäle sind Sicherheitsventile angebracht, durch welche die Luft, wenn der Druck eine bestimmte Grenze überschreitet, entweicht. Dies System ist, soweit der Verfasser weiss, praktisch noch nicht erprobt.

Die bislang beschriebenen Systeme haben in Deutschland niemals Anwendung gefunden; hier, wie auch in vielen anderen Ländern werden zur Fortleitung der elektrischen Ströme für Zwecke der Beleuchtung und Kraftübertragung fast ausschliesslich die Siemens'schen Bleikabel benutzt, die in Beziehung auf Herstellung und Haltbarkeit allen anderen für Verlegung in die Erde bestimmten Leitern bei weitem überlegen sind. Die eigentlichen Bleikabel bestehen in ihrer einfachsten Form aus einer mit Jute umspinnenen Kupferseele, um die herum ein Bleimantel gepresst ist. Der Kupferleiter wird zunächst mit gut getrockneter Jute umspinnen, dann durch eine heissflüssige Isolirmasse gezogen, sodass seine Umhüllung vollständig damit getränkt wird, und schliesslich mit dem Bleimantel umgeben. Zur Herstellung eines vollkommen dichten und überall gleich starken Bleimantels sind besonders konstruirte hydraulische Pressen im Gebrauch, die durch ihren gewaltigen Druck aus einem massiven Bleicylinder im kalten Zustande die schützende Kabelhülle entstehen lassen. Die Wandstärke des röhrenförmigen Bleimantels beträgt je nach der Stärke des Bleikabels 0,5 bis 3 mm. Nach der Grösse der Bleicylinder, die in den Pressen verwandt werden, richtet sich die Länge, in welcher die Kabel hergestellt werden können; die Fabrikationslänge der Kabel vom grössten Querschnitt beträgt 90 m, für geringere Querschnitte werden solche bis 1000 m hergestellt. Als Kupferseelen vom Querschnitt bis zu 25 qmm werden gewöhnlich massive Leiter verwendet, für die stärkeren bis 1000 qmm gehenden Querschnitte sind litzenförmige Leiter in Gebrauch.

Je nach der Verwendung, welche die Kabel finden sollen, werden sie nun weiter bearbeitet. Zunächst wird jedes Bleikabel, nachdem es die Presse verlassen hat, unter Wasser gesetzt und einer elektrischen Prüfung auf Isolation unterzogen; besteht es dieselbe, so ist damit die völlige Dichtigkeit des Bleimantels erwiesen. Gelangen

die Kabel in trockenen Räumen zur Verwendung, so bietet der einfache Bleimantel hinreichenden Schutz, und sie werden alsdann ohne jede weitere Umhüllung verlegt. Sollen die Kabel in die Erde gebettet werden, so tritt die Bleihülle direkt mit der Bodenfeuchtigkeit in Berührung, und diese würde, besonders wenn noch andere chemische Bestandtheile, die das Blei angreifen, zugegen sind, schädlich auf die Kabel wirken. Sämmtliche Bleikabel, die für Verlegung in den Erdboden bestimmt sind, erhalten daher eine weitere Umhüllung aus getheerter Jute. Diese wird zwischen zwei Asphaltlagen gebettet, von denen die erste direkt auf das Blei aufgetragen ist. Sind für die in den Boden verlegten Kabel noch mechanische Verletzungen zu befürchten, die bei der Verlegung oder bei der Vornahme anderer Arbeiten in ihrer Nachbarschaft vorkommen können, so werden die asphaltirten Kabel noch durch eine Eisenhülle geschützt. Früher verwandte man zu diesem Zwecke eine Umspinnung aus Eisendraht, jetzt werden die Kabel mit zwei Lagen Eisenband von gleichem Drall umwunden, sodass die eine Bandeisenlage die offenen Spalten der Umwindungen der unteren Eisenbandspirale deckt. Um das Eisen vor Rost zu schützen, wird dasselbe nochmals mit einer Schicht von asphaltirter Jute umgeben. Es sind Proben von derartig hergestellten Bleikabeln vorhanden, die Jahre lang im Erdboden lagen, und die in Gegenwart aller möglichen auf das Blei zerstörend wirkender Stoffe keine Spur von einer Oxydation desselben oder von einer Verrottung der Juteumspinnung zeigten.

Ausser diesen Kabeln für einen Stromleiter verfertigt die Firma Siemens und Halske auch solche, die zugleich die Hin- und Rückleitung des Stromes enthalten. Diese sogenannten „konzentrischen Doppelkabel“ finden namentlich wegen ihrer geringen Selbstinduktion und Wirkung nach aussen in Wechselstromanlagen Verwendung. Die innere Leitung enthält entweder einen massiven oder litzenförmigen Kupferleiter, die äussere besteht aus einer Anzahl spiralförmig und concentrisch um die Isolationsschicht der inneren Leitung sich legenden Kupferdrähte. Die Schutzhülle um diese Kabel wird je nach der Oertlichkeit, wo sie Verwendung finden, in derselben Weise wie bei den einfachen Kabeln hergestellt.

Besondere Sorgfalt muss bei der Verlegung der Kabel auf die Herstellung der Verbindungen zwischen den einzelnen Stücken verwandt werden. Alle Anstrengungen, welche für die Erzielung einer vollkommenen Isolation bei der Fabrikation der Kabel gemacht sind,

werden hinfällig, wenn die Isolation der Verbindungsstellen nicht mit gleicher Sorgfalt ausgeführt worden ist. Siemens und Halske haben daher ein besonderes System ausgearbeitet, nach dem die Kabelenden für die Verbindung hergerichtet, untereinander verbunden und vor der Berührung mit dem Erdrich geschützt werden.

Fig. 88 zeigt ein solches Kabelende nach seiner Fertigstellung für die Verbindung mit einem zweiten. Wir haben hier ein Kabel mit litzenförmigem Leiter S, dessen Querschnitt über 100 qmm ist. Die verschiedenen Theile der Umhüllung sind zum Zwecke der Verbindung blossgelegt. J ist die die Kabelseele bedeckende Juteschicht, B der Bleimantel, J¹ die diesen umhüllende Juteschicht; links von J¹ sieht man die Oberfläche der wieder mit asphaltirter Jute umgebenen Eisenarmatur. Auf den von der Juteumhüllung befreiten Theil der Kupferseele ist ein ausgehöhlter Messingcylinder geschoben, dessen Hohlraum gerade die Kupferseele umschliesst und dessen äusserer

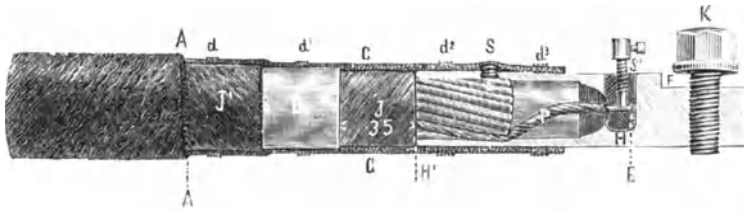


Fig. 88.

Durchmesser gleich demjenigen des Bleimantels ist. Durch Schrauben S ist die Kupferseele gegen die inneren Wandungen des Messingstückes gepresst. Ueber die einzelnen Schichten der Kabelumhüllung, sowie über einen Theil des Messingcylinders ist ein Gummischlauch gezogen und durch seidenumspinnene Dräthe d auf seiner Unterlage befestigt; er verhindert ein Eindringen von Feuchtigkeit in die Schutzhülle des Kabels. Am Ende des Messingcylinders ist eine ebene Fläche F angefräst, die mit einer Kopschraube K versehen ist, und auf der das Ende des benachbarten Kabels verschraubt wird. Eine besondere Erwähnung bedarf auch der sogenannte „Prüfdraht“. Alle Kabel von grösserem Querschnitt als 50 qmm führen einen solchen; derselbe dient dazu, um Messungen über Isolation, über die Spannung an den Enden der Kabel u. s. w. während der Betriebszeit vornehmen zu können. Er ist von dem eigentlichen Stromleiter durch eine besondere Juteumspinnung isolirt. In den Messingcylinder ist zur Verbindung der Prüfdrähte zweier aneinander liegender Kabel

ein kleiner Hartgummicylinder H eingesetzt, welcher die zum Einklemmen des Prüfdrahtes bestimmte Messingschraube S^1 isolirt und zur Aufnahme des Prüfdrahtes längs der Achse des Messingcylinders eine Bohrung besitzt.

Bei dem concentrischen Doppelkabel, Fig. 89, ist die Vorrichtung zur Verbindung der inneren Leiter, dieselbe, wie die eben beschriebene. Der Endverschluss für den äusseren Leiter be-

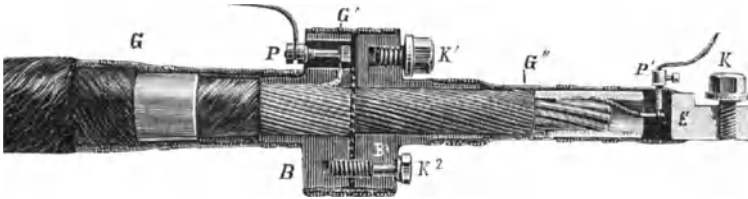


Fig. 89.

steht aus zwei Klemmbacken B und B^1 , zwischen denen die radial emporgebogenen Leiter durch Kopfschrauben K^1 und K^2 zusammengepresst werden. P stellt eine ähnliche Vorrichtung zur Aufnahme des Prüfdrahtes für den äusseren Leiter vor, wie die eben beim einfachen Kabel beschriebene. Die einzelnen Theile des Endverschlusses sind durch passende Gummischläuche G, G' und G'' vor dem Eindringen von Feuchtigkeit geschützt.

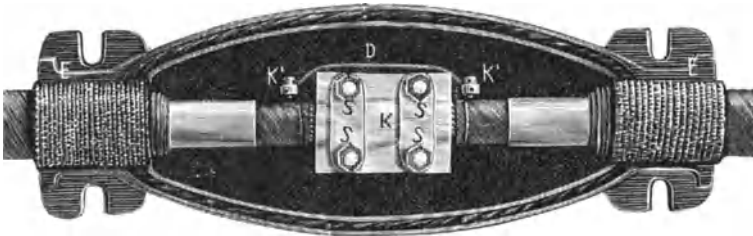


Fig. 90.

Die Art der Verbindung der auf diese Weise hergerichteten Kabelenden und die Schutzvorrichtungen für die Verbindungsstellen der einfachen Kabel, sind aus Fig. 90 zu ersehen. Die eigentlichen Leiter sind an der Klemme K durch die Schrauben S zusammengehalten; die an den Enden des Prüfdrahtes anliegenden Klemmen K^1 stehen durch ein Stück isolirten Draht in leitender Verbindung. Die ganze Verbindungsstelle ist durch ein zweitheiliges gusseisernes Gehäuse, die Verbindungsmuffe, geschützt. Die

kreisförmigen, dem Durchmesser der einzulegenden Kabel entsprechenden Oeffnungen der Muffen sind mit Laschen E versehen, die zur Aufnahme der Mutterschrauben dienen, mit welchen die beiden Muffentheile fest verbunden werden. Nachdem diese Schrauben fest angezogen sind, wird durch eine im oberen Muffentheil befindliche Oeffnung, die durch einen Schraubenstöpsel verschlossen werden kann, in den Hohlraum der Muffe eine heisse, flüssige Isolirmasse eingegossen, die ein Eindringen von Feuchtigkeit in das Innere der Muffe völlig ausschliesst.

Aehnlich ist die Anordnung für die Verbindung zweier concentrischer Kabel, wie sie Fig. 91 zeigt. Man sieht hier am oberen Theile der Muffe die Eingussöffnung m für die Isolirmasse. Fig. 92

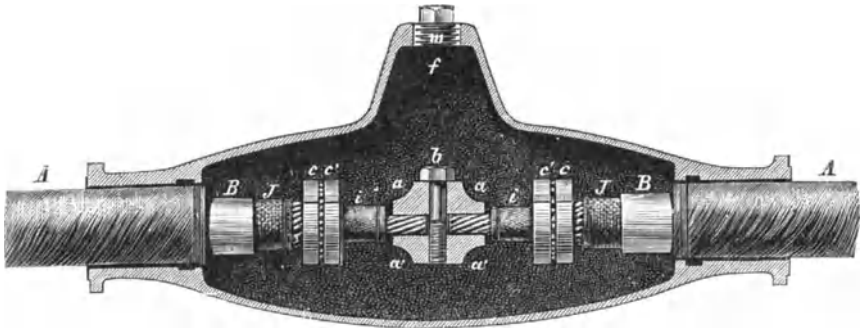


Fig. 91.

stellt eine Verzweigungsmuffe für concentrische Kabel dar und ist nach dem bereits Gesagten ohne weiteres verständlich.

Soll an einer Stelle der in den Hauptkabeln von der Maschinenstation fortgeführte Strom in verschiedene Bezirke vertheilt werden, so führt man die hierzu nöthigen Verbindungen in sogenannten Vertheilungskästen aus. Für die einfachen Kabel gelangen Vertheilungskästen mit Luftisolation, für die Doppelkabel und die Dreileiterkabel solche mit Oelisolation zur Anwendung. Die erstere Art ist in Fig. 93 und 94 angegeben. Ein viereckiger gusseiserner Kasten ist auf einem gemauerten Fundament sicher aufgestellt und kann durch einen mit Gummidichtung versehenen Deckel luftdicht verschlossen werden. Ueber diesem Deckel erhebt sich noch der Brunnenrahmen, der durch einen zweiten im Niveau des Strassenpflasters liegenden Deckel abgeschlossen ist. Je nach der Zahl der ein- und auszuführenden Kabel besitzt der Kasten eine

Anzahl Oeffnungen, welche zur Aufnahme der Stützen St mit abgedrehten Ansätzen versehen sind. In diese Stützen werden die Kabel ähnlich wie früher in die Muffen geführt; die Stützen werden mit einer Isolirmasse ausgefüllt. Sämmtliche positive und sämmtliche negative Enden der eingeführten Kabel werden durch vergoldete Kupferschienen K zu den entsprechenden Sammelstücken E geführt, von wo aus der Strom durch die an ihren Enden vergoldeten Bleisicherungen B in die Vertheilungsleitungen gelangt. Die Sammelstücke werden durch je zwei auf dem Boden des Kastens befestigte

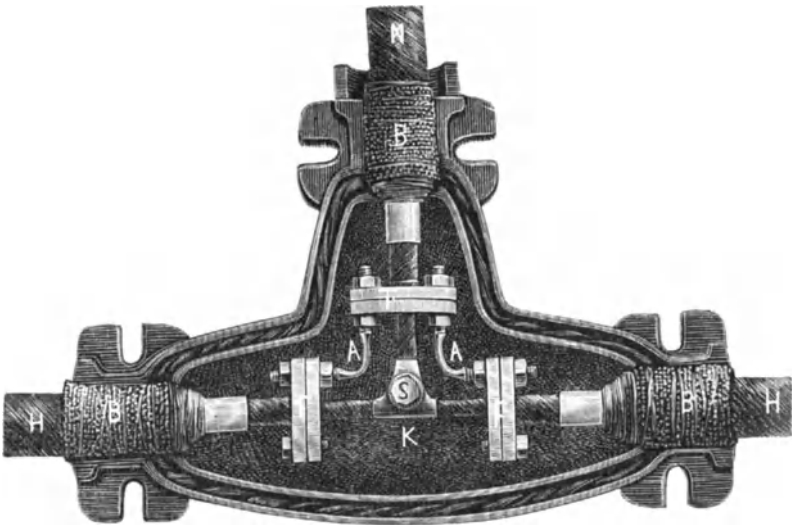


Fig. 92.

Stützen gehalten. Die soeben beschriebenen Kästen sind in den Berliner Centralanlagen vielfach in Anwendung und haben sich dasselbst vorzüglich bewährt.

Die für Doppel- und Dreileiterkabel gebräuchlichen Vertheilungskästen mit Oelisolation haben runde Form; die Stützen sind hier nicht mit Isolationsmasse ausgefüllt, da das im Kasten enthaltene Oel ein Eindringen der Feuchtigkeit verhindert. Fig. 95 u. 96 zeigen einen Verzweigungskasten für das Dreileitersystem. Derselbe ist gleichfalls auf einem gemauerten Fundament aufgestellt und liegt völlig unter dem Strassenpflaster. Als Isolirfüllung wird vollständig

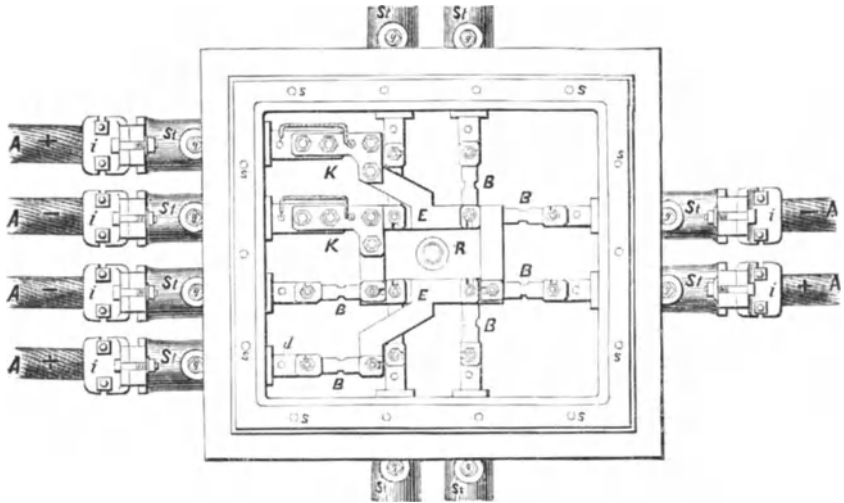


Fig. 93.

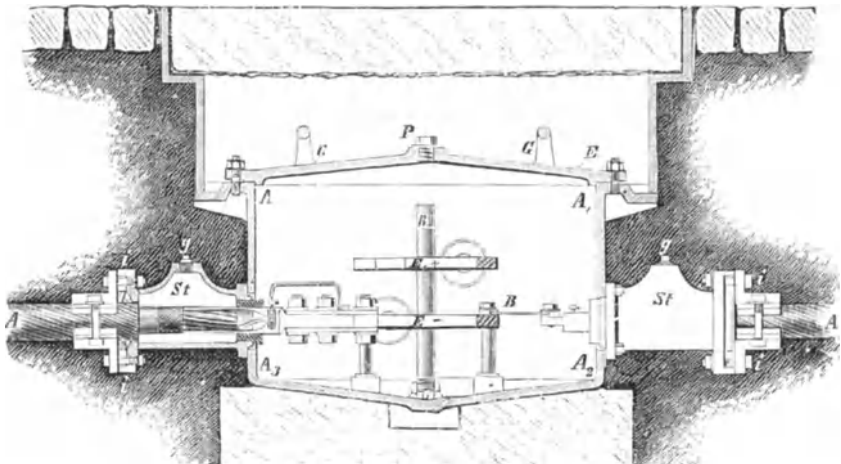


Fig. 94.

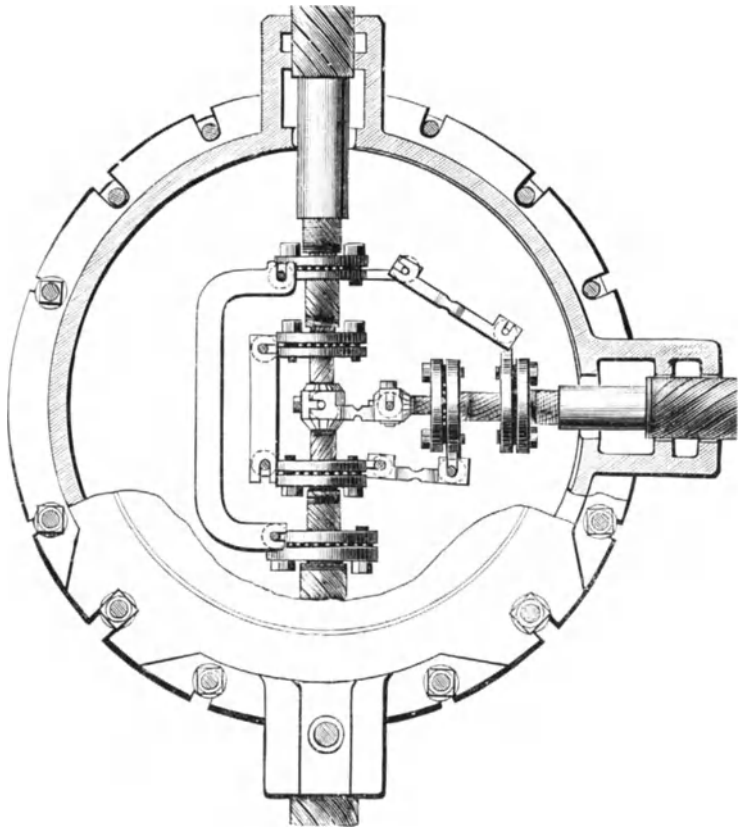


Fig. 95.

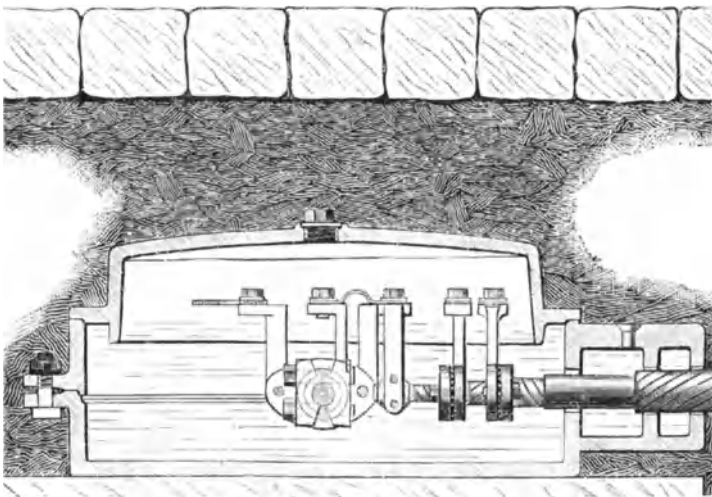


Fig. 96.

wasserfreier schwedischer Kientheer oder ein Isoliröl von sehr hohem specifischen Gewicht verwandt.

Vergleichen wir das Siemens'sche Leitungssystem mit dem Edisonschen, so hat das erstere dadurch einen wesentlichen Vorzug, dass die Bleikabel erheblich länger hergestellt werden können, als die „elektrischen Röhren“. Es ist nicht möglich, letztere länger als in Stücken von 6 m anzufertigen; dabei sind sie nicht biegsam und es muss daher bei jeder Veränderung der Richtung ein besonderes Verbindungsstück eingefügt werden. Jede Verbindungsstelle ist jedoch als ein schwacher Punkt anzusehen und bei gleicher Isolation der Kabel und bei gleich sorgfältiger Ausführung der Verbindungsstellen, wird die Isolation des gesammten Netzes näherungsweise der Zahl der Verbindungsstellen umgekehrt proportional zu setzen sein.

Kapitel IX.

Das Anwendungsgebiet der elektrischen Kraftübertragung. — Vergleichung mit anderen Systemen. — Die Untersuchungen von Beringer. — Hydraulische Uebertragung. — Pneumatische Uebertragung. — Drahtseilübertragung. — Vergleichende Tabellen für den Wirkungsgrad und die Kosten. — Schlussfolgerungen für die Praxis.

Wenn wir die Vorzüge der elektrischen Kraftübertragung richtig beurtheilen wollen, dürfen wir sie nicht für sich allein betrachten, sondern müssen sie mit allem vergleichen, was vorher auf dem Gebiete der Kraftübertragung geschaffen ist. Dieses ist ganz besonders nöthig, da wir in der elektrischen Kraftübertragung eine Neuerung vor uns haben, die mit vielen anderen Systemen in Wettkampf tritt. Seitdem man begann, Arbeitsmaschinen nicht nur mit der Hand zu betreiben, hat man verschiedene Arten der Kraftübertragung angewandt, sodass wir es in Folge dessen mit einer ganzen Anzahl verschiedener Systeme zu thun haben, die im Laufe der Zeit schon sehr vervollkommenet sind. Die elektrische Kraftübertragung tritt daher mit einer grossen Anzahl maschineller Einrichtungen in Wettkampf, und es ist vortheilhaft, dieselbe mit ihnen zu vergleichen. Einige Enthusiasten sahen voraus, dass man in naher Zeit alle Riemen, Räder und Wellen durch elektrische Leitungsdrähte und Motoren ersetzen würde. So sagt Walker im „Electrician“ vom 8. Januar 1886: „Wie leicht, schnell und dauerhaft lassen sich im Vergleich mit Wellen, Seilen, Dampfrohren und Anlagen für Druckluft zwei Kabel verlegen; fast überall, in Minen, Eisenwerken, Werften und Fabriken lassen sie sich anwenden. Ich habe das feste Vertrauen, dass man eines Tages in Fabriken Wellen und Riemen als veraltet ansehen wird; man wird sich darüber wundern, dass man es so lange mit ihnen ausgehalten hat.“ Thatsächlich wird bereits

in verschiedenen Werkstätten von der elektrischen Kraftübertragung ein weitgehender Gebrauch gemacht. Ducommun in Mühlhausen, die Kanonengiesserei in Ruelle, die Industrieschule in Saint-Chamond, die Eisenwerke in La Buire und viele andere benutzen Elektromotoren. In den Werkstätten der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft, der Société Gramme und der Compagnie Électrique wird nicht eine einzige Welle durch Riemen betrieben, alle Werkbänke sind direkt mit kleinen Elektromotoren verbunden, welche durch den Strom eines von der Hauptmaschine betriebenen Generators gespeist werden. In den Werken der Thomson-Houston-Compagnie und in einigen anderen elektrotechnischen Werkstätten in Amerika finden Elektromotoren zum Betriebe der verschiedenen Arbeitsmaschinen gleichfalls ausgedehnte Anwendung. Es ist diesen Anlagen vorgeworfen, dass ihr gesammter Wirkungsgrad nur 50% betrage, d. h., dass nur die Hälfte der von der Dampfmaschine erzeugten Arbeit an den Arbeitsmaschinen wieder gewonnen wird. Dies ist ohne Zweifel etwas gering veranschlagt, aber selbst wenn es richtig wäre, muss man dabei bedenken, dass man keine schweren Wände, keine Träger oder andere Stützen für die Transmissionen mehr nöthig hat, dass keine Wartung mehr erforderlich ist, um die Lager in Ordnung zu halten, und dass vor allem die Riemen fortfallen, deren Unterhaltung kostspielig ist und die oft grosse Gefahr mit sich bringen. Ueberdies hat eine Uebertragung durch Wellen und Riemen gewöhnlich einen geringeren Wirkungsgrad als 50%; denn das bedeutende Gewicht der gesammten Anlage muss stets in Bewegung gehalten werden, ganz unabhängig von der Zahl der gleichzeitig arbeitenden Maschinen und ihrer Belastung. Bei einer elektrischen Kraftübertragung wird dagegen für die stillstehenden Maschinen keine Arbeit verbraucht und auch keine übertragen; die ihnen zugeführte Arbeit ist stets der Belastung proportional. Es ist dies eine Eigenthümlichkeit der elektrischen Kraftübertragung, der zufolge sie sparsamer als irgend ein anderes rein mechanisches Übertragungssystem arbeitet.

Ob Elektrizität schliesslich dazu bestimmt sein wird, Transmissionen, Riemen und andere Einrichtungen, die jetzt allgemein für Kraftübertragung auf kleine Entfernungen üblich sind, völlig zu ersetzen, ist eine Frage, die nur Enthusiasten oder solche, die mit dem technischen Theile des Gegenstandes wenig vertraut sind, mit der nöthigen Kühnheit beantworten können. Der Praktiker

giebt sich damit zufrieden, Schritt für Schritt vorzugehen und erst die mehr Erfolg versprechenden Probleme zu lösen, bevor er diejenigen angreift, welche weniger aussichtsvoll sind. Von diesem Standpunkte aus scheint die Kraftübertragung auf weite Entfernungen ein besseres Anwendungsgebiet für die Elektrizität zu sein, als die Uebertragung auf kurze Entfernungen. Der Grund hierfür liegt nicht darin, dass sich die Energie auf weite Entfernungen elektrisch leichter übertragen lässt, sondern weil die Schwierigkeiten einer rein mechanischen Uebertragung hier so gross werden, dass der Wettkampf leichter wird. Die Schwierigkeiten für alle Systeme der Kraftübertragung wachsen mit der Entfernung, aber für die Elektrizität weniger als für die rein mechanischen Systeme; daraus folgt, dass die Vortheile der elektrischen Kraftübertragung bei grossen Entfernungen besser zur Geltung kommen.

Es giebt vier Systeme von Bedeutung, die für Uebertragung auf lange Entfernungen anwendbar sind:

- die elektrische Kraftübertragung,
- die hydraulische Kraftübertragung,
- die pneumatische Kraftübertragung,
- die Kraftübertragung durch Drahtseilbetrieb.

Wir thun des Dampfes bei der Kraftübertragung auf grosse Entfernungen keine Erwähnung, da er, von einigen amerikanischen Städten abgesehen, nirgends grössere Anwendung gefunden hat; die Ergebnisse bezüglich des Wirkungsgrades waren aber hier so wenig zufriedenstellend, dass man den Dampf kaum als ernstlichen Konkurrenten ansehen kann. Es ist um so weniger nöthig, dieses System besonders zu betrachten, da die Untersuchungen über pneumatische Uebertragung mit geringen Abänderungen auch auf Dampf statt auf Luft anwendbar sind. Wir schliessen ebenso die Kraftübertragung durch Leuchtgas von der Besprechung aus, welche täglich zwischen den fernliegenden Gasanstalten und den im Centrum der Stadt aufgestellten Gasmotoren durch die Gasleitungen vor sich geht. In diesem Falle übertragen wir allerdings streng genommen auch Energie, aber doch nur in latenter Form und keine potentielle Energie, wie bei den oben angeführten Systemen. Wir befassen uns ferner nicht mit der Idee, vermittelst einer einzigen Welle, die sich über die ganze Entfernung erstreckt, Energie zu übertragen, da sie gänzlich unpraktisch ist. Wenn man auch die Kosten einer solchen Anlage und die Schwierigkeit, geeignete Lager für dieselbe zu beschaffen,

nicht als Hinderungsgrund anerkennen wollte, so würde das System doch für grosse Entfernungen völlig ungeeignet sein, weil die Reibung der langen Welle in den Lagern zu viel Kraft erfordert. Eine einfache Berechnung zeigt, dass unter der Annahme von Lagern, die genau in einer Geraden liegen, und bei guter Schmierung eine schmiedeeiserne Welle von gleichförmiger Dicke und 3 km Länge von dem einen Ende aus nicht in Drehung versetzt werden kann, weil der Reibungswiderstand grösser als die Torsionskraft ist, welche die Axe aushält. Wenn die Welle 1,5 km lang wäre, so würden 55% der Kraft, mit der dieselbe aus Sicherheitsgründen höchstens betrieben werden darf, erforderlich sein, um die eigene Reibung zu überwinden, sodass nur 45% am anderen Ende der Welle wiedergewonnen werden könnten; während bei einer Welle von 30 m Länge nur ein Procent durch Reibung verloren geht. Diese Zahlen zeigen, dass die Kraftübertragung durch Wellen nur auf kurze Entfernungen vortheilhaft ist; für unseren augenblicklichen Zweck brauchen wir uns daher mit ihr nicht weiter zu beschäftigen.

Kehren wir nun zu unseren vier Systemen zurück, die bei der Kraftübertragung auf weite Entfernungen in Frage kommen, so hängt die Auswahl des einen oder anderen Systems für einen bestimmten Zweck zum grossen Theil von örtlichen Verhältnissen ab. Wenn letztere für alle vier Systeme gleich günstig sind, so sind die Umstände, die die Wahl bestimmen, die folgenden: Die Grösse der zu übertragenden Kraft, die Zahl der Stunden im Jahre, während der die Anlage im Betriebe ist, der Preis für Pferdestärke und Stunde an der Erzeugungsstelle, der kommerzielle Werth derselben an der Empfangsstelle und schliesslich die Entfernung der beiden Stationen von einander. Beringer hat in seiner interessanten Arbeit ¹⁾ über diesen Gegenstand den Versuch gemacht, die elektrische Kraftübertragung allgemein mit den drei übrigen Systemen zu vergleichen. Bei dieser Vergleichung muss man natürlich von gewissen Annahmen ausgehen, die so nahe als möglich den durchschnittlichen Verhältnissen der wirklichen Praxis entsprechen sollen. So nimmt Beringer als Basis für seine Berechnungen zwei Energiequellen an, nämlich Dampf und Wasser. Bezüglich der ersteren legt er die folgenden von Grove herrührenden Zahlen der Berechnung für Pferdestärke und Stunde, zu Grunde:

¹⁾ Beringer, Kritische Vergleichung der elektrischen Kraftübertragung. Springer, Berlin 1883.

Für kleine Dampfmaschinen	0,316 M.
„ mittlere	„ 0,219 „
„ grosse	„ 0,085 „

Wenn die Maschine an 300 Tagen des Jahres arbeitet und zwar täglich 10 Stunden, so würden die Kosten für Pferdestärke und Jahr bei Verwendung grosser Maschinen demnach 255 M. betragen. Bezüglich der Wasserkraft legt Beringer die Meissnerschen Zahlen zu Grunde, nach denen die Wasserkraft ein Fünftel bis ein Zehntel so viel, wie die Dampfkraft kostet. Demgemäss setzt er bei Anwendung von Wasserkraft die Kosten für Pferdestärke und Jahr zu 56 M. an. Eine ähnliche Berechnung für Gasmotoren ergibt unter der Annahme, dass dieselben stündlich 1 cbm Gas für die Pferdestärke gebrauchen und dass 1 cbm Gas 0,125 M. kostet, als Preis für Pferdestärke und Stunde 0,225 M., einschliesslich Zinsen, Amortisation und Bedienung. Da kleine Dampfmaschinen und Gasmotoren beinahe an jedem Orte aufgestellt werden können, so würde es wenig vortheilhaft sein, die durch diese Primärmotoren erzeugte Kraft auf weite Entfernungen zu übertragen. Ein Kraftübertragungssystem wird sich nur dann rentiren, wenn die Kosten der am entfernten Ende gewonnenen Kraft geringer als diejenigen sind, welche für ihre Erzeugung an dieser Stelle bezahlt werden müssten. Wir brauchen deshalb nur solche Fälle ins Auge zu fassen, in denen grosse Dampfmaschinen oder Wasserräder als billige Krafterzeugungsmittel zur Verwendung kommen.

Es ist bereits auseinandergesetzt, dass der theoretische Wirkungsgrad einer elektrischen Kraftübertragung mit der angewandten Spannung wächst. Auf der anderen Seite werden die Schwierigkeiten, passende Maschinen herzustellen, die Isolation der Leitung aufrecht zu erhalten und die Gefahr, die ein Isolationsfehler mit sich bringt, um so grösser, je höher die Spannung ist, mit welcher das System arbeitet. Es erscheint deshalb vortheilhaft, eine mässige Grenze für die Spannung festzusetzen. Beringer hält die Spannung 1500 V für genügend hoch, um noch eine wirthschaftlich günstige Uebertragung ohne Gefahr für die Sicherheit des Betriebes zu erhalten. Er veranschlagt die Kosten der elektrischen Uebertragung, wenn 5, 10, 50 und 100 Pferdestärken an der Empfangsstation erforderlich sind, und Entfernungen 100, 500, 1000, 5000, 10000 und 20000 m betragen. Die Preise, die für Dynamomaschinen und Motoren angesetzt sind, übersteigen allerdings die augenblicklichen,

und deshalb sind die Veranschlagungen für die Elektrizität weniger günstig, als sie vielleicht sein könnten. So wird der Preis einer achtpferdigen Dynamomaschine zu 4000 M. angenommen, während eine gute Maschine von dieser Leistung heute etwa 2000 M. kostet. Die Vergleichung der elektrischen Kraftübertragung mit den mechanischen Systemen ist deshalb zu Ungunsten der ersteren angestellt; aber der bei der Berechnung begangene Fehler wirkt im richtigen Sinne und zeigt, dass Beringer für die elektrische Kraftübertragung nicht voreingenommen ist. Als Leitung ist in allen Fällen blanker Kupferdraht angenommen, der in der Luft an Stangen und Isolatoren geführt ist; für Hin- und Rückleitung werden besondere Drähte benutzt. Der Drahtdurchmesser ist nach dem Thomsonschen Gesetze berechnet worden. Im Ganzen sind 24 verschiedene Kostenanschläge aufgestellt, deren Resultat in der folgenden Tabelle gegeben ist. Die Zahlen bezeichnen die Kosten einer Pferdestärke an der Empfangsstation in Mark. Die Kosten der Primärmaschine, der Gebäude, der Kessel, des Schornsteins und der hydraulischen Anlage sind nicht eingerechnet, da diese Posten in die Berechnung der jährlichen Kosten einer von der Primärmaschine erzeugten Pferdestärke aufgenommen sind. Die Kosten der Fundamente für die Dynamomaschinen und Motoren, für Messinstrumente und Umschalter sind dagegen berücksichtigt.

Kraft in P.S.	Kosten für Pferdestärke und Jahr in M., wenn die Kraft übertragen wird auf					
	100 m	500 m	1000 m	5000 m	10 000 m	20 000 m
5	1534	1590	1660	2220	2920	4320
10	1060	1102	1155	1570	2100	3150
50	812	836	866	1106	1406	2006
100	655	677	706	920	1210	1770

Bei Veranschlagung der Betriebskosten setzt Beringer für Zinsen und Amortisation 14% des Anlagekapitals fest und nimmt an, dass der Wirkungsgrad der elektrischen Kraftübertragung auf Entfernungen von

100	500	1000	5000	10000	20000	m
69	68	66	60	51	32	%

ist. Für jede an der Empfangsstation erhaltene Pferdestärke müssen also an der Erzeugungsstation

1,45 1,47 1,51 1,67 1,96 3,12 P. S.

aufgewandt werden. Setzt man als Kosten für Pferdestärke und Stunde an der Erzeugungsstation 0,085 M. fest, unter der Annahme, dass die Kraft durch grosse Dampfmaschinen erzeugt wird, so sind die Kosten einer Pferdestärke an der Empfangsstation

0,121 0,125 0,128 0,142 0,166 0,265 M.

Addirt man zu diesen Zahlen die für Zinsen und Amortisation festgesetzten, so erhält man folgende Werthe für die Kosten einer Pferdestärke und Stunde an der Empfangsstation:

Uebertragung von Dampfkraft.

Kraft in P. S.	Kosten für Pferdestärke und Stunde in M., wenn die Kraft übertragen wird auf					
	100 m	500 m	1000 m	5000 m	10 000 m	20 000 m
5	0,188	0,194	0,201	0,239	0,274	0,433
10	0,167	0,173	0,178	0,211	0,258	0,403
50	0,156	0,161	0,166	0,190	0,227	0,353
100	0,149	0,154	0,159	0,182	0,219	0,340

Bei der Zusammenstellung dieser Tafel wurde angenommen, dass die Anlage 3000 Stunden während des Jahres im Betrieb ist.

Wenn Wasserkraft zu übertragen ist, wird es vortheilhaft sein, den Betrieb der Anlage Tag und Nacht aufrecht zu erhalten, da auf diese Weise eine gegebene Anlage die möglich grösste Anzahl Stunden im Jahre arbeitet. Wie hoch sich unter diesen Bedingungen die Kosten für Pferdestärke und Stunde stellen, zeigt die folgende Tafel.

Uebertragung von Wasserkraft.

Kraft in P. S.	Kosten für Pferdestärke und Stunde in M., wenn die Kraft übertragen wird auf					
	100 m	500 m	1000 m	5000 m	10 000 m	20 000 m
5	0,029	0,030	0,031	0,037	0,043	0,070
10	0,022	0,023	0,024	0,030	0,039	0,059
50	0,019	0,020	0,022	0,024	0,028	0,046
100	0,017	0,018	0,019	0,022	0,026	0,042

Die hydraulische Kraftübertragung hat in manchen Punkten Aehnlichkeit mit der elektrischen. Wir haben an der Erzeugungsstation eine Druckpumpe, die das Wasser unter hohem Druck durch Rohrleitungen zur Empfangsstation treibt, wo ein Theil

der Energie durch einen Wassermotor wieder gewonnen wird. Um den Verlust an Energie in Folge der Reibung des Wassers an den Wandungen der Rohre zu verringern, muss die Geschwindigkeit des Wassers möglichst gering sein, oder der Durchmesser der Rohre möglichst gross. Versuchen wir auf diese Weise den Wirkungsrad des Systems zu vergrössern, so haben wir ein grösseres Anlagekapital nöthig. Durch Anwendung des Thomsonschen Gesetzes auf diesen Fall finden wir, dass es für jede gegebene Reihe von Bedingungen einen bestimmten Rohrdurchmesser giebt, für den die Summe der jährlichen Kosten des Energieverlustes und der jährlichen Zinsen des Anlagekapitals ein Minimum wird. Insofern ist die Analogie mit dem elektrischen System eine vollständige, aber es tritt hier noch ein anderer Faktor in die Berechnung ein, welcher die Gültigkeit des Gesetzes beeinflusst. Wir haben gesehen, dass der wirthschaftlich beste Querschnitt nur von der Stromstärke und nicht direkt von der Spannung abhängt. Indirekt hängt er allerdings auch von der Spannung ab, da bei höherer Spannung eine bestimmte Energie mit geringerer Stromstärke übertragen werden kann, und dies wieder eine Verringerung des Leitungsquerschnitts zum Gefolge hat. Aber wenn die Stromstärke eine bestimmte ist, bringt eine Vergrösserung der Spannung keine Verringerung der Kosten für Leitungsmaterial mit sich. Sie würde sogar die Kosten der Anlage etwas erhöhen, da man mehr Sorgfalt auf die Isolation verwenden müsste; aber der Unterschied in den Ausgaben für eine gute und für eine vollständige Isolation ist nicht bedeutend. Bei der hydraulischen Kraftübertragung ist dies etwas anderes. Eine Vergrösserung des Wasserdruckes erfordert eine grössere Ausgabe für das Leitungsmaterial, da die Rohrwandungen verstärkt werden müssen, wenn der Druck ein höherer wird; deshalb hängen hier die Kosten der Leitung nicht nur von der Menge des zu überführenden Wassers, sondern auch von dem Drucke ab, unter dem es steht. Aus finanziellen Rücksichten kann man also den Druck nicht über eine bestimmte Grenze steigern; diese Rücksichten fallen bei der elektrischen Kraftübertragung fort. Die Erhöhung des Druckes ist aber auch auf Grund technischer Ueberlegungen begrenzt. Erstens ist der Wassermotor eine Maschine mit Lagern und anderen beweglichen Theilen, welche nur dann zufriedenstellend und ohne Erhitzung und schnelle Abnutzung arbeiten kann, wenn der Druck zwischen den sich bewegenden Berührungsflächen in vernünftigen

Grenzen bleibt; es ist dies eine Forderung, die von allen Maschinen erfüllt werden muss. Wenn zweitens der Druck über eine bestimmte, durch die Festigkeit des Röhrenmaterials gegebene Grenze erhöht wird, so kann, wie jeder Techniker weiss, keine Verstärkung der Rohrwandungen oder der Arbeitscylinder diese Theile vor Zerstörung schützen. Für die elektrische Spannung giebt es eine solche Grenze bei Dynamomaschinen und Elektromotoren nicht; es lässt sich jede beliebige Spannung anwenden, wenn wir nur für die nöthige Isolation Sorge tragen.

Als weiterer Unterschied von höchster Bedeutung zwischen der elektrischen und hydraulischen Kraftübertragung ist zu erwähnen dass der Elektromotor fast bei allen Belastungen den gleichen Wirkungsgrad hat, während der Wassermotor bei geringer Belastung weit ungünstiger als bei voller arbeit. Die hydraulische Kraftübertragung kann deshalb nur dort angewandt werden, wo die Frage des Wirkungsgrades eine nebensächlicher Bedeutung hat, oder wo die zu übertragende Kraft keinen Veränderungen unterworfen ist.

Alle diese Bemerkungen mit Ausnahme der letzten sind auch für die pneumatische Kraftübertragung zutreffend. Aber da die Reibung der Druckluft an den Rohrwandungen geringer als die des Wassers ist, so kann das pneumatische System auf grössere Entfernungen angewandt werden als das hydraulische. Es ist ferner möglich, einen höheren Wirkungsgrad bei verschiedenen Belastungen zu erzielen, wenn man die Empfangsmaschine mit einem Vorwärmer versieht. Auf der anderen Seite ist jedoch ein Nachtheil zu verzeichnen, welcher der Anwendung eines elastischen Fluidums eigenthümlich ist. Bekanntlich wird bei der Kompression von Luft Wärme erzeugt. Damit nun die Luftpumpe nicht zu heiss wird, muss die Luft in dem Augenblick, in dem sie komprimirt wird, gekühlt werden. Dies geschieht, indem man den Kompressionscylinder mit einer Wasserkühlung umgiebt, oder Wasser durch den Kompressionskolben cirkuliren lässt oder bei jedem Kolbenstoss solches einspritzt. Die zuletzt genannte Methode ist die vortheilhafteste und wurde von Colladon bei den Luftkompressoren benutzt, die beim Bau des Gotthard-Tunnels Anwendung fanden. Sie ist auch von dem Popp'schen System angenommen, durch das Paris mit Druckluft versorgt wird. Die Luft, welche mehr oder weniger mit Feuchtigkeit gesättigt ist (ganz abgesehen von dem einge-

spritzten Wasser), erfährt bei der Ausdehnung und Arbeitsleistung in der Empfangsmaschine eine Temperaturerniedrigung, so dass die Gefahr eines Zufrierens der Ventile und der Röhren der Maschine nahe liegt. Diese Gefahr wird um so grösser, mit je höherer Expansion die Maschine arbeitet, das heisst je höher wir den Wirkungsgrad der Anlage zu gestalten suchen. Damit also die Maschine nicht durch Schnee und Eis verstopft wird, muss man in irgend einer Form Wärme zuführen, indem man entweder heisses Wasser einspritzt oder die Luft vor Eintritt in die Maschinen durch Oefen cirkuliren lässt. Es dürfte genügend ausgeführt sein, dass die an der Erzeugungs- und Empfangstation auftretenden Schwierigkeiten, und die damit verbundene Vergrösserung der Betriebskosten grosse Nachtheile der pneumatischen Kraftübertragung sind, die zum grossen Theile ihre wirthschaftlichen Vortheile vor der hydraulischen Kraftübertragung wieder aufheben. Es mag hier erwähnt werden, dass der Wirkungsgrad des Poppaschen Systems in Paris nach Angaben von Kennedy nur 50% beträgt, und zwar unter sehr günstigen Umständen¹⁾.

Die von Hirn im Jahre 1850 erfundene Kraftübertragung durch Drahtseilbetrieb ist das einfachste und innerhalb vernünftiger Grenzen das wirthschaftlich beste System. Es ist so allgemein bekannt, dass eine nähere Beschreibung an dieser Stelle nicht nöthig ist. Es mag genügen, die hauptsächlichsten Quellen für den dabei auftretenden Energieverlust anzugeben; dieselben sind 1. Reibung der Führungsrollen in ihren Lagern, 2. Luftwiderstand, 3. Steifigkeit der Seile. Der durch Gleiten des Seiles auf den Rollen verursachte Verlust ist wegen seines geringen Betrages zu vernachlässigen. Die Rollen werden in Entfernungen von etwa 100 m angebracht. Zuweilen werden auch grössere Entfernungen angewandt, sie sind aber möglichst zu vermeiden, da sonst der Durchhang der Seile eine übermässige Höhe für die Träger der Rollen erfordert, die durch Temperatureinflüsse bedingte Ausdehnung und Zusammenziehung des Seiles zu gross und die Ausführung von Reparaturen zu schwierig wird. Nach Angaben über Drahtseilübertragungen, die wirklich existiren und

¹⁾ Dass der Wirkungsgrad der Kraftübertragung durch Druckluft grösser ist, ergibt sich aus den neueren Untersuchungen von Riedler, auf dessen Schrift: „Neue Erfahrungen über die Kraftversorgung von Paris durch Druckluft (System Popp)“, Berlin 1891, wegen näherer Einzelheiten dieses Systems verwiesen wird.

sich über Entfernungen von 100 bis 1000 m erstrecken, hat Beringer den Wirkungsgrad dieses Systems, wie folgt, berechnet.

Entfernung	100	500	1000	5000	10000	20000	m
Wirkungsgrad . .	96	93	90	60	37	13	%.

Der plötzliche Abfall des Wirkungsgrades bei längeren Entfernungen rührt von der grossen Anzahl von Zwischenstationen her, die in Anbetracht des Umstandes, dass die Spannweite auf 100 m begrenzt ist, nöthig werden.

Beringer giebt nun eine grosse Anzahl von Kostenanschlägen für Kraftübertragungen durch Druckwasser, Druckluft und Drahtseile, welche in derselben Weise, wie die elektrische Kraftübertragung berechnet sind. Wir folgen ihm hier nicht in allen Einzelheiten, sondern müssen uns mit den Ergebnissen der Berechnungen zufrieden geben, die für den hier zu behandelnden Gegenstand von Interesse sind. Die nachfolgende vergleichende Tabelle giebt den Wirkungsgrad der vier in Frage kommenden Systeme bei verschiedenen Entfernungen an.

Entfernung in m	Wirkungsgrad der Kraftübertragung durch			
	Elektricität ¹⁾	Druckwasser	Druckluft	Drahtseile
100	69	50	55	96
500	68	50	55	93
1000	66	50	55	90
5000	60	40	50	60
10000	51	35	50	36
20000	32	20	40	13

Man sieht, dass für Entfernungen unter 5 km die Kraftübertragung durch Drahtseile wirthschaftlich günstiger ist, als durch irgend ein anderes System. Für Entfernungen über 5 km ist die elektrische Kraftübertragung die wirthschaftlich günstigste. Auch in Bezug auf Anlagekapital ist das Drahtseilsystem für kurze Entfernungen günstiger als das elektrische; die Grenze liegt etwa bei 3 km. Bei grösseren Entfernungen ist das elektrische System das billigste, wie die folgende Tabelle zeigt.

¹⁾ Seit der Zusammenstellung dieser Tafeln wurden grosse Verbesserungen an den Dynamomaschinen und Motoren getroffen, so dass der Wirkungsgrad mehrerer Uebertragungen auf lange Entfernung, die im Betrieb befindlich sind, über 75% beträgt.

Zu übertragende Kraft in P.S.	Art der Kraftübertragung durch	Anlagekapital in M., bezogen auf eine Pferdestärke, wenn die Kraft übertragen wird auf					
		100 m	500 m	1000 m	5000 m	10000 m	20000 m
5	Elektricität . . .	1534	1590	1660	2220	2920	4320
	Druckwasser . .	843	1355	1995	7115	13515	26315
	Druckluft	1506	1986	4310	12310	22310	42310
	Drahtseile . . .	132	634	1260	6268	15526	25048
10	Elektricität . . .	1060	1102	1155	1570	2100	3150
	Druckwasser . .	614	934	1334	4534	8534	16534
	Druckluft	1230	1480	1806	4366	7566	13966
	Drahtseile . . .	104	483	956	4740	9470	18930
50	Elektricität . . .	812	836	866	1106	1406	2006
	Druckwasser . .	314	442	612	1862	3482	6682
	Druckluft	644	740	860	1800	3020	5420
	Drahtseile . . .	37	148	288	1405	2800	5573
100	Elektricität . . .	655	677	706	920	1210	1770
	Druckwasser . .	289	413	568	1808	3358	6358
	Druckluft	542	610	695	1375	2225	3925
	Drahtseile . . .	22	89	172	835	1664	3322

Man sieht, dass die Kosten der elektrischen Uebertragung auf kurze Entfernungen sehr beträchtlich gegen diejenige der anderen Systeme sind. Der Grund hierfür liegt darin, dass die Preise für Dynamomaschinen und Elektromotoren, wie schon gesagt, zu hoch angenommen sind. Bei langen Entfernungen ist dies nicht so merklich, da hier die Leitungen einen bedeutenderen Theil der Kosten bilden, und die elektrischen Leitungsdrähte bedeutend billiger sind, als die gleichwerthigen Wasser- und Druckluftrohre. Wenn wir die Leitungen allein vergleichen, finden wir, dass für die Uebertragung von 10 Pferdekraften ein 3,2 mm dicker Kupferdraht, ein 100 mm weites Wasserrohr, ein 80 mm weites Druckluftrohr oder ein 8 mm starkes Drahtseil nöthig ist. Das Verhältniss der Kosten dieser Leitungen bezogen auf gleiche Entfernungen ist

$$1,4 : 34,8 : 27,8 : 1.$$

Die Leitung für hydraulische Uebertragung kostet deshalb 25 mal soviel und diejenige für pneumatische Uebertragung etwa 20 mal soviel als eine solche für elektrische Uebertragung. Diese Zahlen zeigen, dass bei alleiniger Berücksichtigung des Anlagekapitals das elektrische System am günstigsten arbeitet, wenn die Leitung lang ist, das heisst, wenn die Kraft auf grosse Entfernungen zu übertragen ist.

Kosten einer nutzbaren Pferdekraftstunde an der Empfangsstation.

Maximale zu übertragende Kraft	Kraftübertragungsmittel	Dampfkraft						Wasserkraft						Kosten der Empfangsstation erzeugten Dampfkraft M.		
		wird übertragen auf eine Entfernung von						wird übertragen auf eine Entfernung von								
		100 m	500 m	1000 m	5000 m	10000 m	20000 m	100 m	500 m	1000 m	5000 m	10000 m	20000 m			
P. S.	Elektrizität	M.	0,188	0,194	0,201	0,239	0,274	0,433	M.	0,029	0,030	0,031	0,037	0,043	0,070	0,316
			0,209	0,236	0,263	0,544	0,873	1,653		0,024	0,032	0,040	0,115	0,208	0,399	
			0,225	0,247	0,275	0,438	0,794	1,396		0,033	0,039	0,048	0,106	0,200	0,371	
5	Druckwasser	M.	0,094	0,122	0,157	0,455	0,868	1,899	M.	0,009	0,016	0,025	0,104	0,207	0,406	0,219
			0,167	0,173	0,178	0,211	0,258	0,403		0,022	0,023	0,024	0,030	0,039	0,059	
			0,198	0,213	0,232	0,423	0,641	1,196		0,021	0,025	0,031	0,079	0,138	0,264	
10	Druckluft	M.	0,212	0,224	0,239	0,373	0,521	0,863	M.	0,029	0,032	0,037	0,073	0,118	0,331	0,085
			0,093	0,115	0,142	0,375	0,709	1,593		0,008	0,014	0,021	0,080	0,159	0,333	
			0,156	0,161	0,166	0,190	0,227	0,353		0,019	0,020	0,022	0,024	0,026	0,046	
50	Druckwasser	M.	0,136	0,142	0,150	0,242	0,351	0,651	M.	0,013	0,015	0,018	0,038	0,063	0,119	0,085
			0,168	0,176	0,182	0,239	0,295	0,441		0,018	0,021	0,023	0,037	0,054	0,090	
			0,090	0,098	0,108	0,212	0,376	0,925		0,008	0,009	0,011	0,032	0,060	0,134	
100	Druckluft	M.	0,149	0,154	0,159	0,182	0,219	0,340	M.	0,017	0,018	0,019	0,022	0,027	0,042	0,085
			0,135	0,141	0,148	0,239	0,345	0,570		0,013	0,014	0,016	0,036	0,060	0,095	
			0,167	0,170	0,174	0,218	0,258	0,375		0,018	0,019	0,020	0,030	0,042	0,069	
	Drachseile	M.	0,089	0,095	0,102	0,184	0,319	0,813	M.	0,007	0,008	0,009	0,023	0,042	0,099	

Es würde jedoch nicht richtig sein, die vier Systeme auf dieser Grundlage allein zu vergleichen. Die Vergleichung muss gleichzeitig das Anlagekapital und den Wirkungsgrad berücksichtigen, mit anderen Worten: die Zahl, welche der Güte eines jeden Systems entspricht, ist der Preis, der an der Empfangsstation für Pferdestärke und Stunde zu bezahlen ist.

Je geringer der Preis, um so besser ist das System. Ein Blick auf die vorstehende Tafel zeigt, dass die Kosten einer Pferdestärke bei allen Systemen mit der Entfernung wachsen, aber bei der elektrischen Uebertragung geht diese Zunahme nicht so schnell vor sich, wie bei den anderen Systemen. Die Tafel zeigt ferner, dass bis zu einer Entfernung von 1000 m die Drahtseilübertragung besser als die elektrische ist, aber dass für höhere Entfernungen die letztere vorteilhafter wird. Die hydraulische und pneumatische Uebertragung sind nur in wenigen Fällen besser als die elektrische, aber auch dann hat die Drahtseilübertragung noch grössere Vortheile. Demnach scheint sich für die Verwendung des hydraulischen und pneumatischen Systems kein Gebiet zu finden, mit Ausnahme der Fälle, in denen die anderen Systeme aus besonderen Gründen nicht zulässig sind oder in denen das Wasser und die Luft noch eine weitere Verwendung finden, nachdem sie die Arbeit geleistet haben. Dies ist der Fall, wenn man pneumatische Motoren beim Tunnelbau verwendet. Hier muss unter allen Umständen der Ventilation wegen Luft nach den äussersten Arbeitsgebieten geführt werden, und man giebt deshalb der pneumatischen Kraftübertragung den Vorzug vor allen anderen Systemen, die ausserdem eine besondere Ventilationsanlage erfordern würden.

Die letzte Kolumne auf der rechten Seite der Tafel giebt die Kosten für Pferdestärke und Stunde in Mark an, wenn man die Kraft an der Empfangsstation durch eine Dampfmaschine erzeugen und so eine Kraftübertragung unnöthig machen würde. Es ist augenscheinlich vorteilhafter, eine Dampfmaschine an Ort und Stelle aufzustellen, wenn man mit derselben zu einem billigeren Preise Kraft erzeugen kann, als durch eine Kraftübertragung von einer entfernten Quelle. Wenn eine Wasserkraft elektrisch übertragen wird, so ist die an der Empfangsstelle aufgestellte Dampfmaschine in allen angeführten Fällen theurer; aber wenn die Kraftquelle eine Dampfmaschine ist, dann hängt es von der Entfernung und von dem Betrage der erforderlichen Kraft ab, ob die an Ort und Stelle arbeitende Dampfmaschine billiger ist

oder nicht. Nehmen wir an, es wären 10 Pferdekkräfte an der Empfangsstation erforderlich, und wir könnten diese Kraft für 2,20 M. stündlich von einer kleinen dort aufgestellten Dampfmaschine erhalten. Wenn sich nun im Umkreise von 3 km von dem Orte, an dem die Kraft erforderlich ist, eine sparsam arbeitende grosse Dampfmaschine befände, so könnten wir diese Maschine zum Antreiben einer Dynamomaschine benutzen und die Kraft elektrisch übertragen. Die stündlichen Kosten der zehn Pferdestärken, die wirklich vom Motor geleistet werden, würden dann etwa 2 M. betragen, also um 10% billiger sein, als wenn wir die Kraft an Ort und Stelle durch eine Dampfmaschine erzeugten. In diesem Falle würde sich die elektrische Kraftübertragung eben bezahlen. Wäre die Entfernung etwas über 3 km, so würde sie sich schon nicht mehr rentiren. Wenn andererseits die zu liefernde Kraft klein ist, sagen wir unter fünf Pferdestärken, dann bringt die elektrische Kraftübertragung grosse Vortheile. Fünf Pferdestärken, die durch eine kleine Dampfmaschine erzeugt werden, kosten 1,60 M. stündlich, während wir dieselbe Kraft auf eine Entfernung von 3 km zu 1,10 M. stündlich übertragen können, was einem Gewinn von 0,50 M. in der Stunde entspricht.

Stellen wir die einzelnen in der Tabelle verzeichneten Ergebnisse zusammen, so kommen wir zu folgenden Schlüssen:

1. Es rentirt sich, billige Wasserkräfte zu übertragen; und zwar durch Drahtseilbetrieb bei Entfernungen unter 1,5 km und durch Elektrizität bei grösseren Entfernungen. Dies gilt für jeden Betrag der Kraft.

2. Es rentirt sich, billige Dampfkraft zu übertragen, wenn der Kraftbedarf an der Empfangsstation zehn Pferdestärken nicht übersteigt. Bei Entfernungen unter 1,5 km ist Drahtseilbetrieb anzuwenden, bei Entfernungen von 1,5 km bis 3 oder 4 km ist elektrische Uebertragung zu wählen. Bei weiteren Entfernungen und grösseren Kräften arbeiten kleine Dampf- oder Gasmaschinen an Ort und Stelle billiger.

Kapitel X.

Eintheilung der Dynamomaschinen. — Die Dynamomaschinen von Edison-Hopkinson, von Thomson-Houston, von Immisch, von Laurence, Paris und Scott, vom Manchester-Typus, von Elwell-Parker, von Crompton, von Andrews, von Goolden, vom Phönix-Typus, von Kapp, von Brown, von Siemens und Halske, von Schuckert, von der Allgemeinen Electricitäts-Gesellschaft und von den Deutschen Electricitätswerken.

Unsere Betrachtungen bezogen sich bislang auf die allgemeinen Principien der elektrischen Kraftübertragung und auf die allgemeinen Bedingungen, denen Generator und Motor genügen müssen; eine Einschränkung der Untersuchungen auf einen speciellen Maschinentypus fand dabei nicht statt. Wir müssen jetzt den Gegenstand von einem mehr praktischen Standpunkt betrachten, indem wir zu einer eingehenden Beschreibung der heute gebräuchlichen Dynamomaschinen und Motoren übergehen. Wir wollen hier keine Anweisungen geben, wie Dynamomaschinen entworfen und konstruirt werden; es fragt sich vielmehr, wie die vorhandenen Maschinentypen am besten für die elektrische Kraftübertragung benutzt werden können, und zu diesem Zwecke genügt es, eine Beschreibung derjenigen Typen zu geben, die sich in der Praxis am meisten bewährt haben. Die Maschinen können, wie auch im Kapitel IV geschehen, nach der Form ihres Ankers eingetheilt werden.

Wir unterscheiden :

1. den Trommelanker; die Ankerdrähte sind längs der Oberfläche und über die Enden des Kerns gewickelt;
2. den Cylinderringanker; der Ankerdraht ist längs der Oberfläche und durch den inneren Raum des Kerns gewickelt;
3. den Flachringanker, der sich nur durch die Abmessungen des Kerns vom vorigen unterscheidet; der Durchmesser ist gross im Verhältniss zur Länge.

Der Trommelanker erfordert zur Erzeugung derselben elektromotorischen Kraft weniger Draht als der Cylinderringanker, da die auf der Stirnfläche des ersteren verlaufenden Drähte im allgemeinen kürzer als diejenigen sind, welche im Inneren des letzteren liegen; soll aber der Trommelanker zur Erzeugung hoher elektromotorischer Kräfte dienen, so hat er den Nachtheil, dass sich verschiedene Drahtlagen an den Stirnflächen kreuzen. Dies ist aus zwei Gründen unvortheilhaft. Erstens sind Drähte, zwischen denen grosse Spannungsdifferenzen herrschen, in unmittelbare Nähe an einander gebracht, sodass leicht Kurzschlüsse entstehen können; zweitens sind Reparaturen schwer auszuführen, da man, um einen Draht zu erreichen, erst alle über demselben liegenden Drähte entfernen muss. Im Cylinder- und Flachringanker herrschen dagegen sowohl zwischen den im Inneren, als auch zwischen den aussen verlaufenden Drähten keine hohen Spannungsdifferenzen, und jede Spule kann, ohne die übrige Wickelung zu beschädigen, entfernt und durch eine neue ersetzt werden.

Jede der drei oben erwähnten Typen kann nun weiter eingetheilt werden, je nachdem die Oberfläche des Kerns glatt ist oder Vorsprünge aufweist, welche die Wickelung durchsetzen. Eine derartige Eintheilung würde indessen hier nicht am Platze sein, da dieser Gegenstand wohl eher in einer Abhandlung über die Konstruktion der Dynamomaschinen besprochen werden müsste, als in einer solchen über ihre Anwendung zur Kraftübertragung. Es mag hier genügen, eine kurze Beschreibung der wichtigsten Maschinen zu geben, ohne dass wir den Versuch machen wollen, eine systematische und erschöpfende Aufzählung der verschiedenen in der Praxis gebräuchlichen Dynamomaschinen zu liefern.

Die Edison-Hopkinsonsche Dynamomaschine.

Diese Maschine ist eine verbesserte Form der ursprünglichen Edisonschen, mit welcher zum ersten Male grössere Mengen elektrischer Energie erzeugt wurden. Dieselbe war mit Trommelanker versehen; der Kern bestand aus Eisenscheiben, die auf der Achse befestigt und durch Bolzen zusammengehalten wurden. Das Feld wurde durch Magnete mit gemischter Wickelung erzeugt; dieselben bestanden aus einer Anzahl langer schmiedeeiserner Cylinder von verhältnissmässig kleinem Durchmesser, die auf der einen Seite an die Polschuhe und auf der anderen an das durch einen gusseisernen

Block gebildete Joch stiessen. Diese Anordnung war natürlich einmal unvortheilhaft, weil der magnetische Widerstand der dünnen Magnetschenkel sehr hoch war, und zum andern, weil man mehr Draht zur

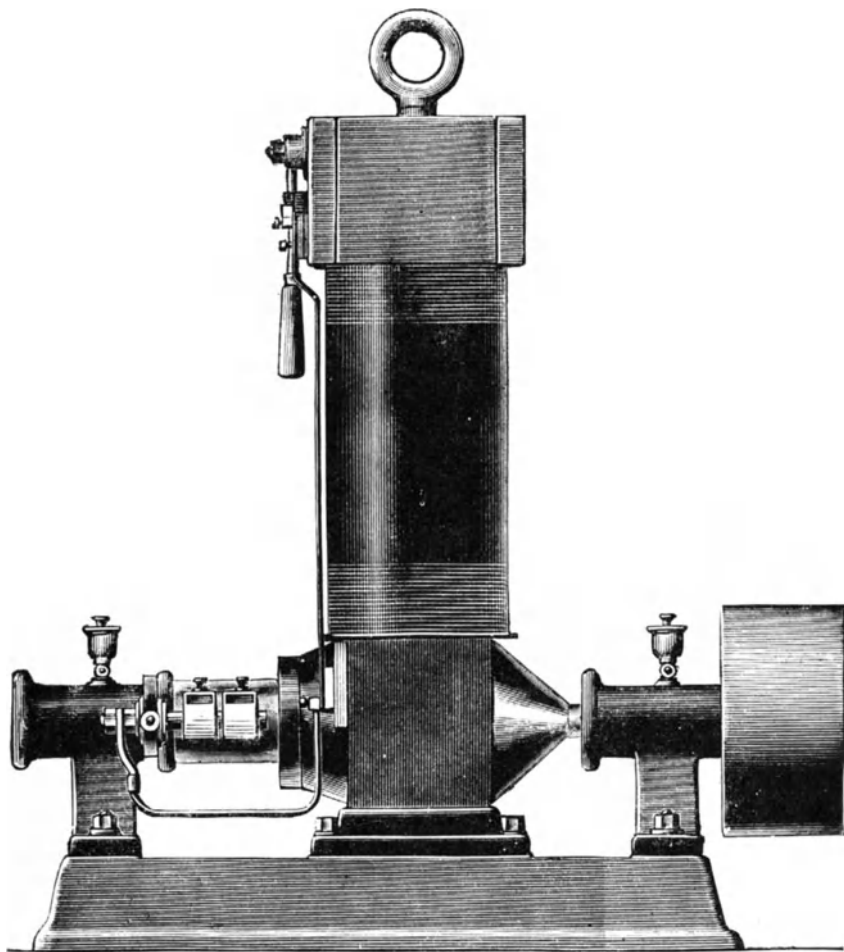


Fig. 97.

Magnetisirung einer Anzahl kleiner Magnete, als zu der eines einzigen Magnetes von gleichem Querschnitt gebraucht. Da der specifische magnetische Widerstand von Gusseisen bedeutend höher als derjenige von Schmiedeeisen ist, so müssen die gusseisernen Theile des magnetischen

Stromkreises grösseren Querschnitt als die schmiedeeisernen haben. Wird dieser Anforderung an einer Stelle nicht genügt — wie oben bei der Verbindung zwischen Schenkeln und Joch einerseits und Pol-

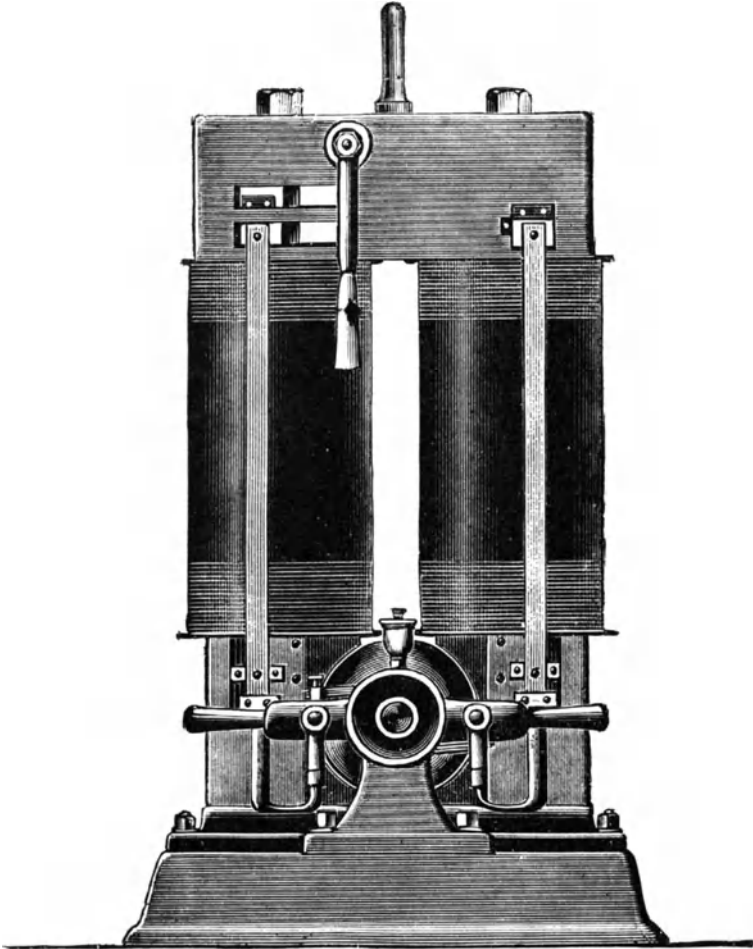


Fig. 98.

schuhen anderseits —, so wird hier die Bahn der Kraftlinien eingeengt, und die gesammte Feldstärke geschwächt. Ein weiterer Fehler der ersten Edisonschen Maschine bestand darin, dass die zum Zusammenhalten des Ankerkerns verwandten Bolzen von diesem nicht isolirt

waren und so zu starken Lokalströmen Veranlassung gaben, welche Wärme erzeugten und Energie verbrauchten. Hopkinson hat bei seiner Konstruktion die hier aufgezählten Fehler vermieden und so Maschinen geschaffen, die bei derselben Grösse des Ankers ungefähr die doppelte Leistung der älteren Maschinen gaben. Die Edison-Gesellschaft hat später diese verbesserte Konstruktion angenommen. Eine dieser neuen Dynamomaschinen ist in Fig. 97 und 98 abgebildet. Die den Anker bildenden Eisenscheiben sind durch starke, auf der Achse verschraubte Mutterbleche zusammengehalten, und auf diese Weise die von Edison verwandten Bolzen vermieden. Das Feld wird durch ein einziges Hufeisen gebildet, die Magnetkerne haben rechteckigen, an den Ecken abgerundeten Querschnitt ($46 \text{ cm} \times 24 \text{ cm}$), dessen Flächeninhalt 1080 qcm beträgt. Der Anker hat einen Durchmesser von 25 cm und ist mit 80 Drähten oder 40 vollen Windungen bewickelt; jede Windung besteht aus 16 Adern eines Drahtes von $1,75 \text{ mm}$ Durchmesser. Ein in mehrere Adern getheilter Draht wurde benutzt, weil sich derselbe besser biegen und über die Stirnflächen legen lässt. Der Kommutator besteht aus 40 Kupfersegmenten, welche durch Glimmer isolirt sind. Der Widerstand der Magnetwicklung, die parallel zum Anker und äusseren Stromkreis liegt, beträgt 16 Ohm , während derjenige des Ankers nur $0,09 \text{ Ohm}$ ist. Bei einer Geschwindigkeit von 800 Umdrehungen in der Minute ist die elektromotorische Kraft 110 Volt , die höchste Stromstärke beträgt 300 Ampère . Aehnliche Maschinen, jedoch mit Wickelung für 250 Volt , werden bei der elektrischen Strassenbahn zwischen Bessbrook und Newry benutzt, wo die Triebkraft durch Turbinen geliefert wird.

Die Thomson- Houstonsche Dynamomaschine.

Diese Maschine scheint wegen ihrer hohen elektromotorischen Kraft besonders für Kraftübertragung auf grosse Entfernungen geeignet. Fig. 100 giebt eine allgemeine Ansicht dieser bemerkenswerthen Maschine. Der Anker besteht nur aus drei Spulen, von denen jede aber viele über einen ellipsoidförmigen Kern gewickelten Windungen besitzt. Der Kern wird aus einer gusseisernen Schale gebildet, welche mit Eisendraht bewickelt ist. Da die Windungsflächen der Kupferspulen wie bei allen Trommelankern die Achse enthalten, so ist die radiale Tiefe der Spulen in der Nähe der Achsen am grössten und am Aequator des Ellipsoids am kleinsten, sodass die Oberfläche

des Ankers eine richtige Kugelfläche wird. Die Feldmagnete sind kurze gusseiserne Cylinder, die an ihren äusseren Enden mit Flanschen versehen sind, um so eine Befestigung der schmiedeeisernen Stäbe, welche das Joch bilden, (siehe Fig. 43) zu ermöglichen. Die inneren Enden der Kerne tragen Polschuhe und sind zu Kugelflächen ausgebildet, zwischen denen der Anker rotirt.

Die Wirkungsweise der Maschine wird durch Fig. 99 verständlich werden, in der schematisch der Anker, der Kommutator, die Bürsten und die Polschuhe NS dargestellt sind. Da diametral gegenüberliegende Punkte derselben Spule sich stets vor Polen von entgegengesetzten Vorzeichen bewegen, so sind die an diesen Punkten erzeugten elektromotorischen Kräfte von einem festen Punkt im Raum

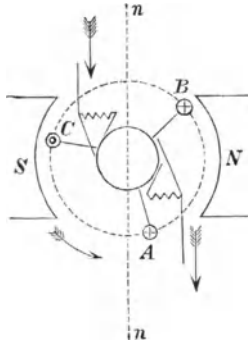


Fig. 99.

aus betrachtet einander entgegengerichtet, für den Draht sind sie jedoch gleich gerichtet. Bei der Betrachtung der Wirkungsweise des Ankers wird es daher genügen, jede Spule durch eine halbe Drahtwindung zu ersetzen; die Wirkung bleibt dieselbe, nur wird ihre Intensität verringert. ABC mögen die Enden der drei halben Windungen sein. Die Spulen selbst sind auf folgende Weise hergestellt. Zunächst wird eine Hälfte der Spule A gewickelt, indem man den Anfang des Drahtes frei in der Nähe der Achse liegen lässt. An diese Wickelung schliesst sich der Anfang von B; die erste Hälfte dieser Spule wird in derselben Weise gewickelt und bildet mit A einen Winkel von 120° . Dann wird der Anfang von C mit diesen beiden Spulen verbunden; hier wird die ganze Spule auf einmal gewickelt und bildet mit den beiden anderen einen Winkel von 120° . Dann wird Spule B fertig gestellt, schliesslich Spule A, und

damit ist die Wickelung beendet. Die drei freien Enden der Spulen werden durch die hohle Achse nach aussen geführt, wie es Fig. 100 zeigt, und mit den drei Kommutatorsegmenten verbunden, von denen jedes einen Winkel von etwas weniger als 120° bildet,

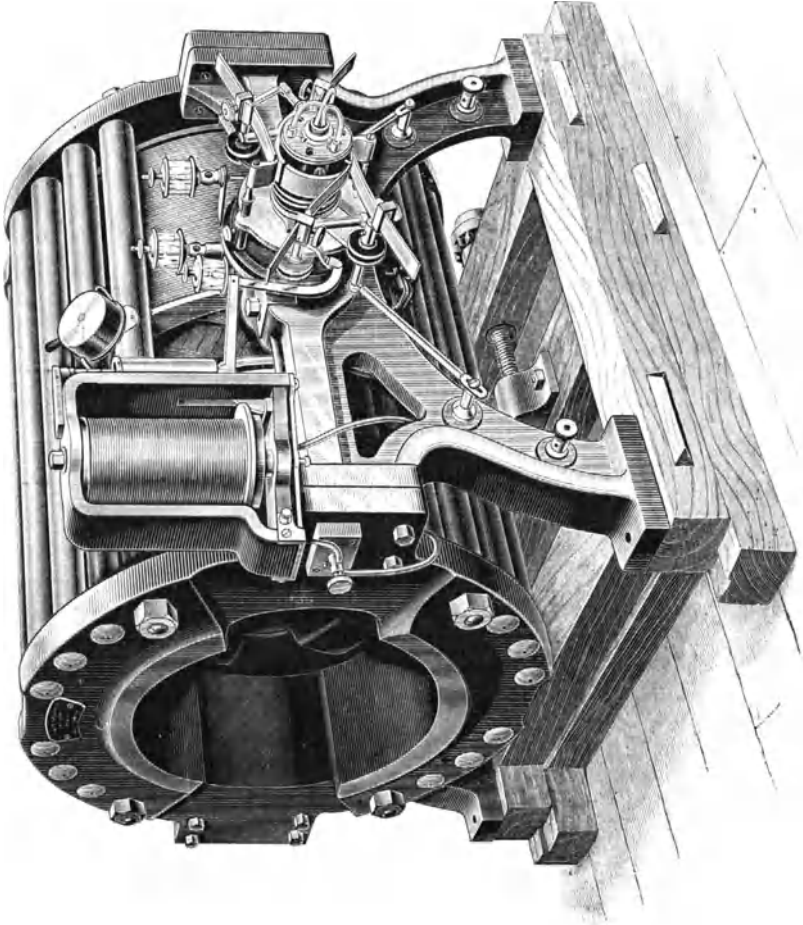


Fig. 100.

sodass zwischen je zwei benachbarten Segmenten ein Luftzwischenraum übrig bleibt.

Wir nehmen an, dass in Fig. 99 die Kraftlinien von einem Polschuh zum andern geradlinig verlaufen. Dann ist nn eine neutrale Linie; wenn die Ankerdrähte dieselbe passiren, wird keine elektro-

motorische Kraft in ihnen erzeugt. Rechts von dieser Linie ist die elektromotorische Kraft auf den Beschauer zu gerichtet — in der Figur ist dies durch ein kleines Kreuz angedeutet — links von ihr ist sie vom Beschauer fort gerichtet — dies ist in ähnlicher Weise durch einen kleinen Kreis bezeichnet. An jeder Seite der neutralen Linie sind zwei Bürsten angebracht, die unter sich einen Winkel von etwa 60° bilden und leitend verbunden sind. Der Strom tritt in den Anker bei den Bürsten an der linken Seite ein und verlässt ihn bei denjenigen an der rechten Seite. Da die Kommutatorsegmente einen Winkel von ungefähr 120° mit einander bilden, so wird die Spule A, sobald sie durch die neutrale Linie gegangen ist, mit der unteren positiven Bürste in Berührung treten, während B die obere positive Bürste erst einen Augenblick vor Eintritt in die neutrale Linie verlässt. Jede Spule ist deshalb fast während einer halben Umdrehung in Berührung mit einer der beiden Bürsten, zwei Spulen sind während des sechsten Theiles einer Umdrehung parallel und mit der dritten Spule hintereinander geschaltet. Wenn B die neutrale Linie passirt hat, wird sie mit C parallel und hinter beide A geschaltet. Das nächste Sechstel einer Umdrehung schaltet C und A parallel und B hinter beide u. s. w. Man sollte denken, dass die Stromstärke bei der geringen Zahl der Kommutatorsegmente pulsiren würde. Dies ist jedoch nicht der Fall, und die Konstanz der Stromstärke rührt zum Theil daher, dass jede Spule, wenn sie sich im stärksten Felde befindet, mit den beiden anderen, die sich im schwächsten Felde befinden, verbunden ist, und zum Theil auch von dem Auftreten der Selbstinduktion in der Wickelung der Feldmagnete, welche mit dem Anker und dem äusseren Stromkreise hintereinandergeschaltet sind. Die magnetische Trägheit des Feldes setzt jeder plötzlichen Aenderung der Stromstärke einen bestimmten passiven Widerstand entgegen und wirkt in derselben Weise als beruhigendes Mittel, wie ein schweres Schwungrad, welches die Geschwindigkeit einer Dampfmaschine konstant zu halten bestrebt ist. Die Selbstinduktion spielt ferner eine wichtige Rolle im Anker. In Folge derselben setzt jede Spule, wenn sie die neutrale Linie passirt, dem Entstehen des Stromes keinen so grossen Widerstand entgegen, und es wird verhindert, dass ein rückwärts gerichteter Strom in jeder einzelnen Spule verläuft, wenn sie in einen schwachen Theil des Feldes gelangt. In einem symmetrischen Felde werden die elektromotorischen Kräfte in A und B in dem Augenblicke gleich

sein, wenn diese Spulen gleich weit von der neutralen Linie entfernt sind. Ist jedoch A in eine Stellung gelangt, in welcher der Betrag der von ihr geschnittenen Kraftlinien grösser ist, so ist B in solcher Lage, dass die Zahl der von ihr geschnittenen Kraftlinien kleiner ist. Es werden deshalb die elektromotorischen Kräfte der beiden Spulen, welche (wie oben gesagt) parallel geschaltet sind, nicht mehr einander gleich sein. Wenn in B keine Selbstinduktion wirkte, würde der Ueberschuss der elektromotorischen Kraft in A einfach einen Lokalstrom in den beiden Spulen erzeugen. Dieser Strom würde für den äusseren Stromkreis nutzlos sein, und die auf diese Weise verlorene Energie würde sich in einer Verringerung der wirklichen Klemmenspannung geltend machen. In Wirklichkeit ist dies nicht der Fall. Obgleich die Spule B eine geringere elektromotorische Kraft als A hat, so ist sie doch in Folge der Selbstinduktion im Stande, eine Zeit lang dem Strome Widerstand zu leisten, den A im umgekehrten Sinne durch sie zu schicken sucht. Dieser Widerstand kann nur eine sehr kurze Zeit anhalten, nach deren Verlauf, um bildlich zu sprechen, B von A überwunden würde; aber die Zeit, während der die Spulen parallel geschaltet sind, ist gleichfalls ausserordentlich kurz. Läuft eine Maschine mit 850 Umdrehungen in der Minute, so würde nur der einhundertundsiebenzigste Theil einer Sekunde erforderlich sein, um die Spule B aus der Stellung, in der sie noch mit A gleiche elektromotorische Kraft hat, in eine solche überzuführen, in der sie bereits von A getrennt ist. So klein dieser Zeitraum auch erscheinen mag, er genügt doch, um in B einen gewissen, wenn auch nicht starken Strom von umgekehrter Richtung zu erzeugen. Dies ist von Vortheil. Denn wenn sich die Spule B durch die neutrale Linie hindurch bewegt hat, wird sie mit C parallel geschaltet, und könnte so einen bedeutenden Lokalstrom von der letzteren Spule empfangen, welche zu dieser Zeit in der Nähe des Bereiches ihrer höchsten Wirkung ist. Aber da die Spule B von A einen vorwärtsgerichteten Strom empfing, bevor sie die neutrale Linie passirte, so verhindert dieser Strom und die Selbstinduktion der Spule B für kurze Zeit, dass die Spule C einen rückwärts gerichteten Strom in B entstehen lässt. Kurz darauf ist B selbst in einen stärkeren Theil des Feldes gelangt und so der Sitz einer hohen elektromotorischen Kraft geworden. Einen Augenblick später befindet sich die Spule C in einem schwachen Theile des Feldes und empfängt von B einen aufwärts gerichteten Stromimpuls, der

sie für die Parallelschaltung mit A beim Passiren der Vertikalen auf der neutralen Linie vorbereitet u. s. w. Man kann natürlich nicht erwarten, dass diese einzelnen Vorgänge mit mathematischer Schärfe verlaufen, und dass sich die entgegenwirkenden Kräfte ganz genau das Gleichgewicht halten. Es ist deshalb eine Vorrichtung erforderlich, durch welche etwaige Ungleichmässigkeiten, die sich durch Funkenbildung am Kommutator zu erkennen geben, beseitigt werden. Zu diesem Zwecke ist an der Maschine ein Blasebalg angebracht, dessen Luftstrom auf die beiden Punkte des Kommutators gerichtet ist, an welchen die zuerst die Kommutatorsegmente berührenden Bürsten anliegen. Die Wirkung des Blasebalgs ist intermittierend und so geregelt, dass ein Luftstrom in jedem Augenblick entsteht, wenn ein Segment die Bürste verlässt, und die hierbei entstehenden Funken ausbläst.

Die Maschine ist für konstante Stromstärke selbst regulirend; es ist dies durch eine elektromagnetische Vorrichtung erreicht (auf der linken Seite der Fig. 100), die eine Zunahme der Winkel zwischen jedem Bürstenpaare bewirkt, wenn die Stromstärke zu hoch wird. Der Anker wird hierdurch auf kürzere oder längere Zeit in sich selbst kurz geschlossen und so die Klemmenspannung verringert. Eine eingehende Beschreibung dieser Vorrichtung giebt ein Artikel des Verfassers in „The Engineer“ vom 28. August 1885.

Die Dynamomaschine von Immisch.

Sie wird sowohl als Generator als auch als Motor gebraucht und ist seit ihrer ersten Kronstruktion verschiedenen Veränderungen unterworfen worden. Immisch versuchte bei den ersten Maschinen die magnetische Induktion zwischen den gleichen Polen des Ankers und der Feldmagnete zu verringern und die zwischen den entgegengesetzten zu vergrössern, indem er einen Theil der Polschube abschnitt. Ferner suchte er durch Anbringung eines doppelten Kommutators und einer doppelten Ankerwicklung den Einfluss der Selbstinduktion abzuschwächen, welche in den Ankerspulen auftritt, wenn die Richtung des Stromes in ihnen umgekehrt wird. Aber diese Bemühungen wurden aufgegeben, und die Dynamomaschine von Immisch hat so eine Form erhalten, welche der grossen Zahl von Maschinen sehr ähnlich ist, die sich nicht durch besondere Eigenarten auszeichnen, aber doch in der Praxis sehr gute Dienste gethan haben. Maschinen für hohe Spannung sind mit Cylinderringanker,

solche für niedrigere Spannungen mit Trommelanker ausgerüstet; das Feld wird in allen Fällen durch einen doppelten Hufeisenmagneten nach dem Manchestertypus gebildet. Bei kleinen Maschinen besteht

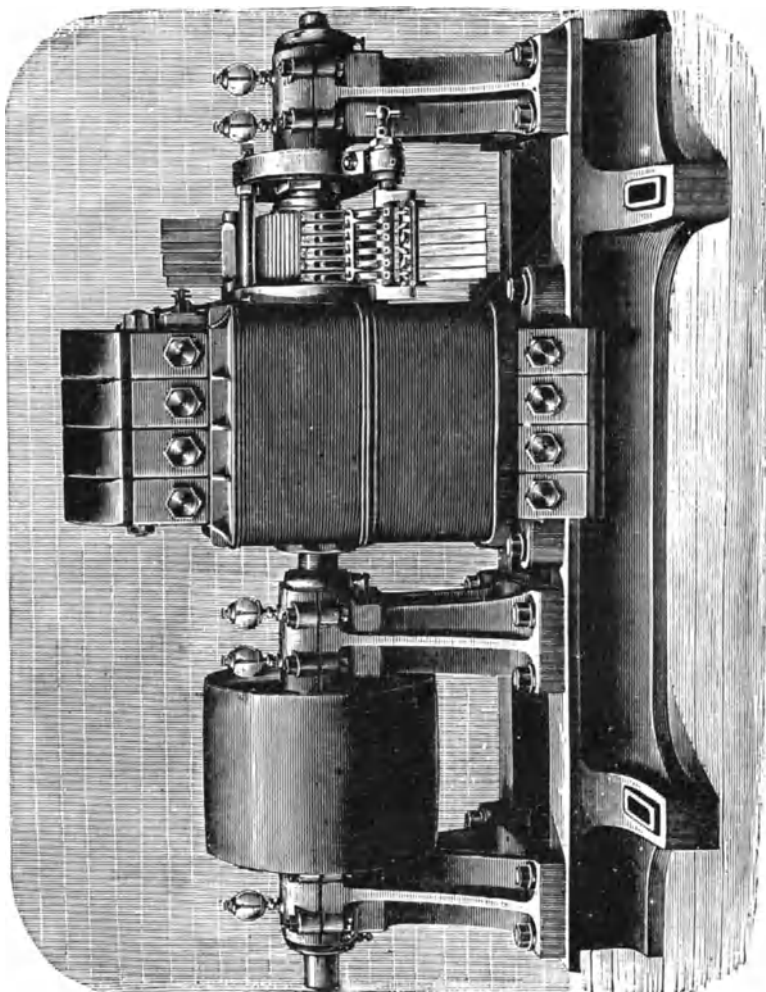


Fig. 101.

der Kern jedes Feldmagneten aus einer einzelnen schmiedeeisernen Platte, aber bei grösseren Maschinen ist jeder Kern aus einer Anzahl solcher Platten zusammengesetzt, theils um die Herstellung zu er-

leichtern, theils um eine Erwärmung der Schenkel zu vermeiden. Dies ist nicht nur durch die grössere Oberfläche erreicht, die man durch Zertheilung der Magnetkerne gewinnt, sondern auch durch die Schwächung der in den Eisenmassen verlaufenden Wirbelströme. Die Dynamomaschinen von Immisch werden viel

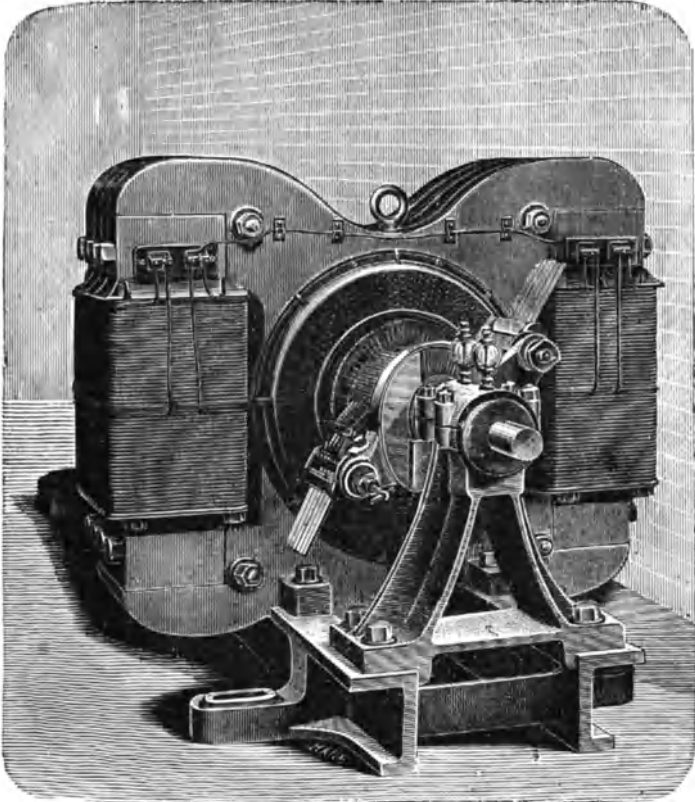


Fig. 102.

in Bergwerken zum Betriebe von Pumpen verwandt; hier verursacht die stark wechselnde Belastung in vielen Fällen grosse Stromschwankungen. Die magnetisirende Kraft (die Maschinen besitzen Hauptstromwicklung) ist in Folge dessen auch plötzlichen Veränderungen unterworfen und erzeugt deshalb starke Schwankungen

in der Feldstärke, welche wieder Wirbelströme in den Eisenmassen der Magnete entstehen lassen. Durch Zertheilung der letzteren werden diese Ströme auf ein zulässiges Mass beschränkt. Die Abbildungen in Fig. 101 und 102 stellen den Maschinentypus dar, welcher gewöhnlich zum Betriebe von Bergwerkspumpen benutzt wird. Aeusserlich zeigen Generator und Motor kaum einen Unterschied, obgleich der kreisförmige Ausschnitt der Polschuhe des letzteren einen etwas kürzeren Bogen als derjenige des ersteren umfasst, und auch die Magnetschenkel schwächer gehalten und mit weniger Draht bewickelt sind. Der Anker ist in beiden Maschinen derselbe. Der Güte der Firma Immisch u. Co., London, verdankt der Verfasser die nachfolgenden Einzelheiten einer Anlage, die in St. John's Colliery, Normanton, errichtet wurde. Der Generator machte 480 Umdrehungen in der Minute und lieferte im Durchschnitt einen Strom von 59 Am bei 690 V Klemmenspannung. Der Querschnitt eines jeden Magnetkerns betrug 1030 qcm, derjenige des Ankerringes 350 qcm. Der Anker hatte einen Durchmesser von 61 cm, eine Länge von 40 cm und eine radiale Tiefe von 11,4 cm. Er war als Cylinderring mit 760 Windungen bewickelt, sein Widerstand betrug 0,36 Ohm. Auf jedem Schenkel waren 984 Windungen angebracht; die beiden Schenkelwickelungen waren parallel geschaltet. Die magnetisirende Kraft war demnach bei einer mittleren Stromstärke von 59 Am etwa gleich 29000 Ampère-Windungen. Der Widerstand der Feldmagnete betrug 0,25 Ohm. Die Bogenlänge des kreisförmigen Ausschnitts der Polschuhe betrug in der Mitte des Ankers etwa 150° und an seinen Enden 140° , die Bürsten waren um etwa 20° nach vorn verschoben. Das Gewicht der gesammten Maschine belief sich auf 5500 kg. Beim Motor hatten die Feldmagnete einen Querschnitt von 740 qcm, und die erregenden Spulen bestanden nur aus fünf Drahtlagen; es entspricht dies 840 Windungen auf jedem Schenkel und einer erregenden Kraft von etwa 24000 Ampère-Windungen. Die Bogenlänge des Ausschnitts der Polschuhe betrug 130° in der Mitte des Ankers und 120° an seinen Enden; die Bürsten waren um etwa 15° nach rückwärts verschoben. Aus diesen Zahlen ergibt sich für den Generator eine Kraftliniendichte von 17100 Einheiten des C.G.S.-Systems, für den Motor eine solche von 15600 Einheiten.

Bei kleinen Motoren und besonders, wenn an Gewicht gespart werden muss, wendet Immisch einen gewöhnlichen doppelten Hufeisenmagneten von dem in Fig. 30 abgebildeten Typus an. Der Strassenbahnmotor in Fig. 103 hat ein solches Feld. Er wiegt 360 kg

und kann bei einer Geschwindigkeit von 360 Umdrehungen in der Minute 10 P.S. leisten.

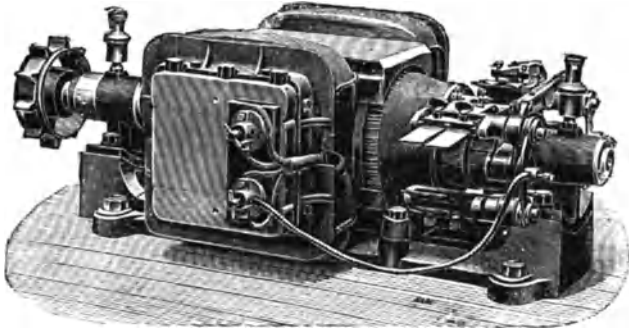


Fig. 103.

Die Dynamomaschine von Laurence, Paris und Scott.

Diese Maschine wird in zwei Typen hergestellt, das kleinere Modell zeigt Fig. 104, das grössere Fig. 105. Die Anordnung der

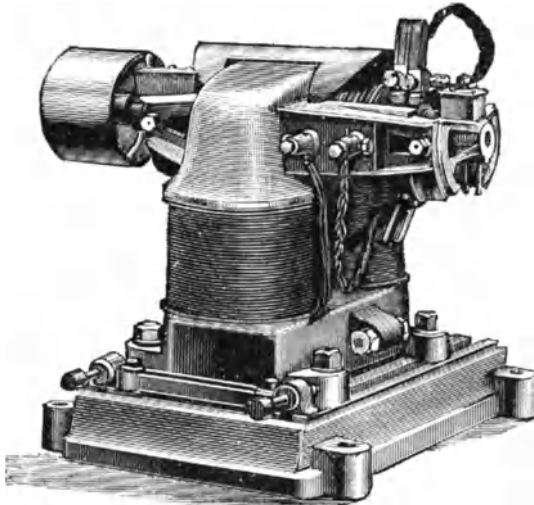


Fig. 104.

Feldmagnete und des Ankers beim letzteren Typus mit doppelten Hufeisenmagneten zeigt Fig. 106. Die Magnete sind aus Gusseisen und sehr gedungen; der Anker ist eine Pacinottische Trommel mit sehr tiefen und engen Zähnen. Die Ankerscheiben haben sechseckige

Bohrungen, in welche die Achse von entsprechendem Querschnitt passt, sodass die Befestigung des Ankers die nöthige Sicherheit für den Betrieb bietet. Die Aktien-Gesellschaft Laurence, Paris und Scott hat auch nach diesem Entwurfe sogenannte Motor-Generatoren (Gleichstromtransformatoren) gebaut. Die Maschinen dienen zur Umwandlung hochgespannter Ströme in solche von niedriger Spannung und haben zu diesem Zwecke eine doppelte Ankerwicklung und zwei Kommutatoren, einen an jedem Ende der Achse. Die

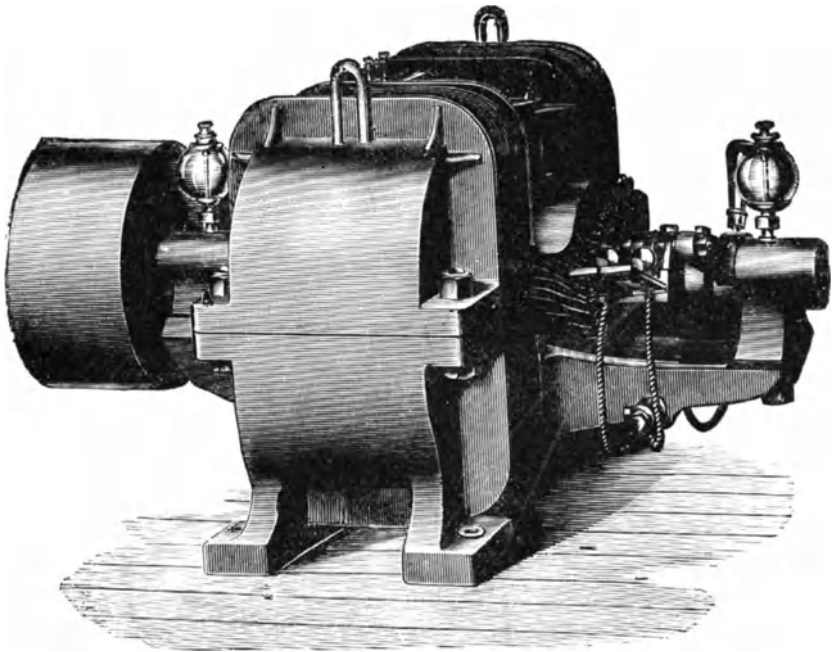


Fig. 105.

dünnen Windungen versetzen beim Stromdurchgang den Anker in Drehung, und so entsteht ein niedrig gespannter Strom in den dicken Windungen. Die Wickelungen füllen abwechselnd die Einschnitte im Anker aus, und deshalb hebt die Selbstinduktion des einen Stromkreises diejenige des anderen auf; die Stromabnahme kann daher an beiden Kommutatoren bei jeder Belastung ohne die geringste Funkenbildung vorgenommen werden, und die Bürsten brauchen für die verschiedenen Belastungen nicht verstellt zu werden. Da nur innere Kräfte auftreten, das heisst solche, die zwischen den Drähten

der beiden Stromkreise wirken, so findet nur ein geringer Kraftverlust durch Reibung in den Lagern statt, und die Umsetzung kann einen sehr hohen Wirkungsgrad erreichen. Eine derartige Maschine war auf der Ausstellung von Newcastle im Jahre 1887 zu sehen;

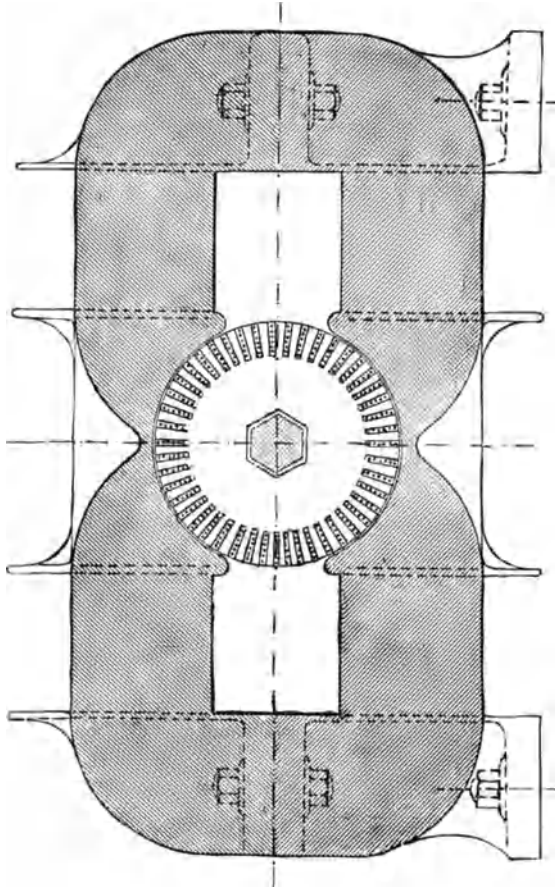


Fig. 106.

der Verfasser untersuchte sie und erhielt sehr günstige Ergebnisse. Die Maschine erregte damals grosse Aufmerksamkeit, und man glaubte allgemein, dass solche Maschinen recht bald für Kraftübertragung auf weite Entfernung und für Umwandlung der Energie in Gebrauch kommen würden, besonders in Verbindung mit Central-

stationen. Diese Hoffnungen sind jedoch unerfüllt geblieben; indessen hat wenigstens eine Gesellschaft für elektrische Beleuchtung in London die Gleichstromtransformatoren als Hauptbestandtheil ihres Systems angenommen. Es ist dies die Chelsea Company; sie will die Leistung ihrer Akkumulatorenbatterien dadurch erhöhen, dass sie Gleichstromtransformatoren mit ihrem System vereinigt, welche direkt von den Dynamomaschinen der entfernten Centralstation betrieben werden. Eine der grössten Schwierigkeiten, die zu überwinden ist, bevor diese Maschinen mit Sicherheit angewandt werden können, bietet die Isolation zwischen den beiden Ankerwickelungen. Bei Verwendung eines Primärstromes von 1000 bis 2000 Volt Spannung muss natürlich die Isolation der dünnen Windungen vom Ankerkern und von den dicken Windungen eine vollkommene sein, da man sonst Gefahr läuft, die hohe Spannung in die Häuser zu bekommen. Ingenieure, die Erfahrungen an Wechselstromtransformatoren gesammelt haben, wissen, wie schwer sich hier eine vollkommene Isolation zwischen der primären und sekundären Wickelung herstellen lässt. Da diese aber nicht in Bewegung und keinen mechanischen Kräften unterworfen sind, so kann bei guter Ausführung ein hinreichend grosser Raum für die Isolation vorgesehen werden. Dagegen sind rotirende Transformatoren sehr im Nachtheil. Der Raum für die Isolation wird an einer Stelle gefordert, wo er sehr knapp ist, nämlich auf dem Anker; die Spulen können nicht so zusammengedrängt werden, wie bei einem Wechselstromtransformator, sondern müssen sich über die ganze Oberfläche des Ankers ausbreiten und geben so zu Isolationsfehlern Veranlassung. Ausserdem suchen die auf die Drähte und die Isolation wirkenden mechanischen Kräfte die letzteren zu zerstören. Die Schwierigkeiten sind so gross, dass es besser ist, beide Wickelungen nicht auf einem Kern anzubringen, sondern zwei getrennte Maschinen zu benutzen, die entweder durch Riemen mit einander verbunden oder deren Achsen von einander isolirt gekuppelt sind. Ausserhalb der Maschine ist für die Isolation leicht Raum zu beschaffen. Deshalb kann diese Kuppelung, obgleich sie mechanischen Kräften unterworfen ist, dennoch vollkommen isolirt hergestellt werden. Der ganze Motor kann auch noch von dem Erdboden isolirt sein, so dass die Gefahr einer Verletzung in Folge innerer Isolationsfehler vermindert und völlige Sicherheit für den sekundären Stromkreis erreicht wird.

Um nun wieder auf die Maschinen zurückzukommen, die jetzt

von Laurence, Paris und Scott verfertigt werden, so ist der Verfasser durch die Bereitwilligkeit der genannten Firma in den Stand gesetzt, einige Einzelheiten über den Generator und den Motor mitzuthellen. Der Anker der in Fig. 105 abgebildeten Maschine hat einen Querschnitt von 190 qcm, vom Grunde der Einschnitte an gerechnet; die Zahl der für die Induktion wirksamen Drähte beträgt 208, die der Kommutatorsegmente 52. Die Magnetkerne haben einen Querschnitt von 630 qcm und sind mit Compoundwicklung versehen. Die 28 direkten Windungen sind am oberen Theile der Schenkel angebracht und bestehen aus 114 mm breitem und 0,65 mm dickem Kupferband. Die Nebenschlusswindungen befinden sich auf dem unteren Theile der Schenkel und stellen eine erregende Kraft von 6468

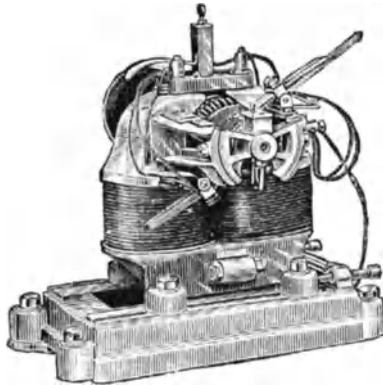


Fig. 107.

Ampère-Windungen dar, während die direkten Windungen bei voller Belastung 3360 Ampère-Windungen bilden; die gesammte erregende Kraft beträgt also 9828 Ampère-Windungen. Die Maschine giebt bei 710 Umdrehungen in der Minute einen Strom von 120 Am bei 100 V Spannung. Unter der Annahme, dass die Kraftlinien nur in dem nicht gezähnten Theile des Ankers verlaufen, ergiebt sich aus diesen Zahlen für die Induktion im Anker die bemerkenswerth hohe Zahl von 21500 C.G.S.-Einheiten. Es ist jedoch anzunehmen, dass ein Theil der Kraftlinien auch in den Vorsprüngen verläuft, und deshalb wird die Kraftliniendichte im mittleren Theile des Ankers etwas kleiner als die angegebene Zahl sein.

Fig. 107 zeigt einen Motor für eine Spannung von 100 V und eine Leistung von 1,5 P.S. Der Ankern hat einen Durchmesser

von 8,6 cm und ist 11,6 cm lang. Der Querschnitt des Eisens im Anker beträgt 49 qcm; auf dem Anker befinden sich 720 wirksame Ankerdrähte, die 1,1 mm dick sind. Der Querschnitt der gusseisernen Feldmagnete ist 114 qcm, die Wickelung liegt im Nebenschluss zum Anker und besteht aus 4960 Windungen eines Drahtes von 0,64 mm Durchmesser; ihr Widerstand beträgt warm 140 Ohm. Um das Angehen zu erleichtern, ist auf einem Schenkel eine kleine Hauptstromspule angebracht, die durch einen eisernen, am oberen Theile der Maschine über den Polschuhen angebrachten Hebel kurz geschlossen werden kann. Wenn die Magnete erregt sind, wird der Hebel nach unten gezogen und durch einen kleinen Haken festgelegt. Hat die Maschine eine bestimmte Geschwindigkeit angenommen, so wird der Hebel mit der Hand ausgelöst und die erregenden Hauptstromwindungen dadurch kurz geschlossen. Die Maschine arbeitet dann als reine Nebenschlussmaschine und regulirt sich annähernd selbst. Wird sie angehalten, so wird der Hebel durch eine Feder nach oben gezogen, schaltet dadurch wieder die Hauptstromspule und den Anker hinter einander und setzt die Maschine für das nächste Angehen in Bereitschaft. Das Gewicht des Motors beträgt 70 kg, und seine Geschwindigkeit 1300 Umdrehungen in der Minute.

Die Manchester-Dynamomaschine.

Die Gestalt der Feldmagnete giebt der Maschine ein sehr gedrungenes Ansehen. Die Konstruktion ist überall sehr vortheilhaft, wo es auf Streuung und grosses Gewicht nicht ankommt.

Wie aus Fig. 108 ersichtlich, bildet der magnetische Stromkreis ein doppeltes Hufeisen; die erregenden Spulen sind auf dem Theile der Magnete angebracht, welcher bei anderen Maschinen das Joch bildet. Die Polschuhe sind schwere, gusseiserne Blöcke; an dem unteren sind die Lager befestigt, welche die Ankerachse tragen. Die Magnetkerne sind schmiedeeiserne Cylinder, deren Enden genau in die Vorsprünge der Polschuhe eingepasst sind. Die Berührungsfläche zwischen den guss- und schmiedeeisernen Theilen des magnetischen Kreises ist ungefähr zweimal so gross als der Querschnitt der Magnetkerne. Auf diese Weise werden die Kraftlinien, welche aus dem Material von besserer magnetischer Leitungsfähigkeit in dasjenige von schlechterer übertreten, nicht zusammengedrängt, wie dies zuerst bei den Edisonschen Maschinen der Fall war. Der Anker besteht aus einer Reihe dünner schmiedeeiserner Scheiben, die an ihrer Pe-

ripherie von einander isolirt und auf der Achse durch metallene Arme befestigt sind. Die Ankerdrähte halten sich indessen auf dem Anker nur durch Reibung, welche durch die Anwendung der üblichen Bindedrähte verstärkt ist. Die Dimensionen einer Maschine von 200 Am und 110 V sind nach „The Engineer“ vom 7. August 1885 die folgenden: Die Magnetkerne haben einen Durchmesser von 19 cm; die Länge der erregenden Spulen, die auf besondere, metallene Röhren gewickelt sind, beträgt 31,7 cm; der Ankerkern hat einen Durchmesser von 30,5 cm und ist auch 30,5 cm lang. Der Anker ist als Grammescher Ring gewickelt; es sind auf ihm 120 Windungen eines

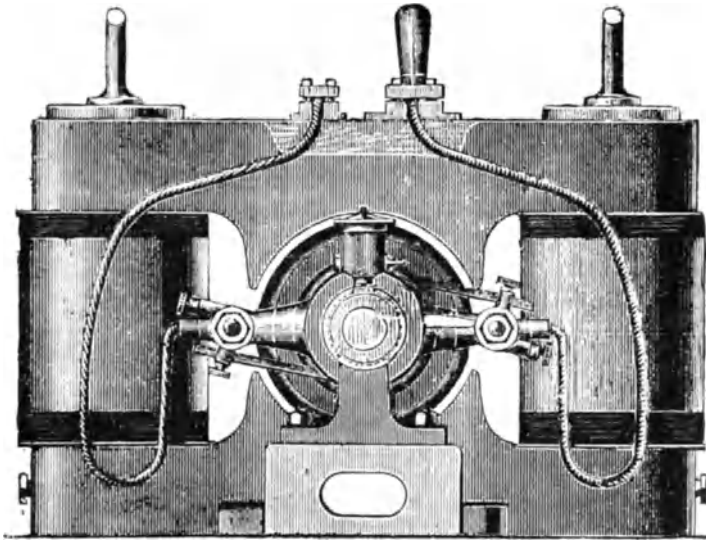


Fig. 108.

Drahtes von 5,1 mm Durchmesser angebracht, die in der üblichen Weise zu dem 40theiligen Kommutator geführt sind; der Ankerwiderstand beträgt 0,023 Ohm. Die Feldmagnete sind mit Kompoundwicklung versehen; der Widerstand der Nebenschlusswindungen ist 19,36 Ohm, derjenige der Hauptstromwindungen 0,012 Ohm. Auf jedem Schenkel sind 1680 Nebenschlusswindungen eines Drahtes von 1,6 mm Durchmesser und 42 Hauptstromwindungen, deren jede aus drei Drähten von 5,2 mm Durchmesser besteht. Die normale Geschwindigkeit beträgt 1050 Umdrehungen in der Minute. Für Ventilation des Ankers ist nicht gesorgt.

Die Dynamomaschine von Elwell-Parker.

Die Maschine, welche ursprünglich unter diesem Namen bekannt war, hat in den letzten Jahren erhebliche Veränderungen erfahren.

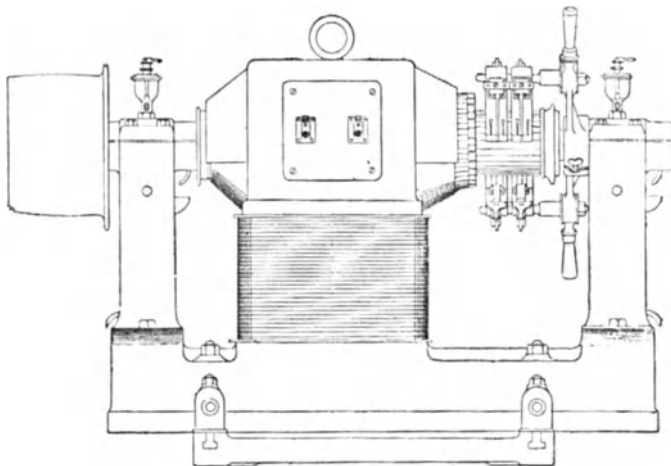


Fig. 109.

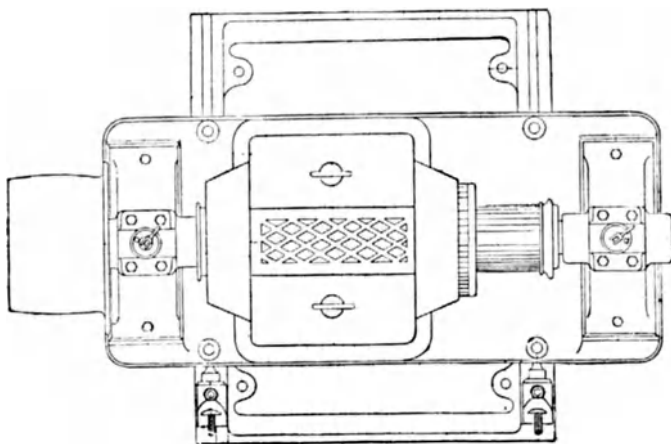


Fig. 110.

In ihrer ersten Form war sie mit Grammeschem Ringanker versehen; der Kern desselben war aus Eisendrähten gebildet, die an Trägern aus Kanonenmetall befestigt waren. Das Feld hatte die

doppelte Hufeisenform und bildete einen quadratischen Rahmen, in dessen Mitte sich der Anker zwischen den gusseisernen Polschuhen befand. Die neueren Maschinen besitzen meistens einen Trommelanker; das Feld wird bei kleinen und mittleren Maschinen aus einem einfachen Hufeisen gebildet, während die grösseren als vierpolige Maschinen gebaut werden. Der Ankerkern besteht aus Eisenscheiben, welche in der üblichen Weise auf der Achse befestigt sind; die Feldmagnete sind aus Schmiedeeisen. Fig. 109 und 110 geben Ansichten des Typus, nach dem kleinere und mittlere Maschinen gebaut werden. In derselben Weise werden auch Motoren angefertigt, wenn an Gewicht und Raum gespart werden soll; anderenfalls werden Maschinen mit doppelhufeisenförmigem Felde verwandt.

Bei den grösseren Dynamomaschinen ist der Anker, wie Fig. 111 zeigt, von vier Polen umgeben; je zwei diametral gegenüberliegende

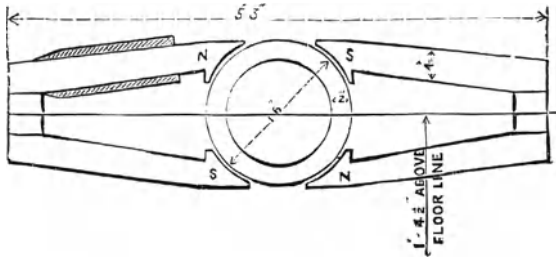


Fig. 111.

haben dasselbe Vorzeichen. In Folge dieser Anordnung, die zuerst in den jetzt längst veralteten Ephinstone-Vincent'schen Maschinen getroffen wurde, verlaufen vier verschiedene Kraftlinienstromkreise durch den Anker, und man muss deshalb zur Abnahme des Stromes vier Bürsten benutzen. Wenn die Punkte gleichen Potentials auf dem Ankerdraht fest mit einander verbunden wären, wie es bei den Ephinstone-Vincent'schen und den Victoria-Maschinen geschehen ist, so würden zwei Bürsten genügen. Der Vortheil der Verwendung von vier Polen liegt darin, dass man die doppelte Stromstärke erhalten kann, ohne die Stromdichte im Ankerdraht zu vergrössern. Auf der anderen Seite büst man einen kleinen Theil der elektromotorischen Kraft ein, da der Luftzwischenraum vergrössert und folglich die Feldstärke geschwächt ist. Bei Cylinderankern muss die Oberfläche eines jeden Polschuhes (λb in der Formel, die Kapitel IV gegeben wurde) augenscheinlich um so kleiner sein, je mehr ein-

Additional material from *Elektrische Kraftübertragung*,
ISBN 978-3-642-49443-7 (978-3-642-49443-7_OSFO1),
is available at <http://extras.springer.com>



zelne Polschuhe rings um den Anker anzubringen sind; folglich hat auch eine vierpolige Maschine einen höheren magnetischen Widerstand, als eine zweipolige von derselben Grösse.

Fig. 112 zeigt eine der verschiedenen Dynamomaschinen dieser Art, die den Strom für die Blackpool Electric Tramway liefern. Jede derselben ist für eine Stromstärke von 180 Am und eine Spannung von 200 V bei 350 Umdrehungen in der Minute bestimmt. Die Feldmagnete werden durch besondere kleine Dynamomaschinen erregt.

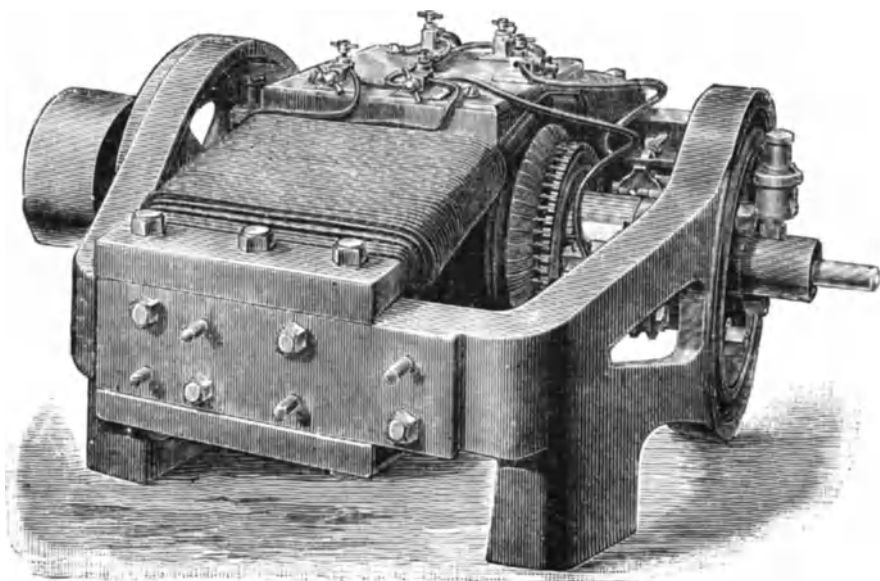


Fig. 113.

Die Motoren, welche für die Strassenbahnwagen benutzt werden, sind in Fig. 113 abgebildet, während Fig. 114 eine ältere Form des Motors darstellt, welche bei Strassenbahnen mit Akkumulatorenbetrieb angewandt wird.

Die Cromptonsche Dynamomaschine.

Der Kern des Cromptonschen Ankers besteht aus einer Anzahl dünner schmiedeeiserner Scheiben, von denen etwa 10 auf 1 cm kommen; sie sind aussen glatt, aber innen mit drei oder mehreren schwalbenschwanzförmigen Einschnitten versehen, die gleichen Ab-

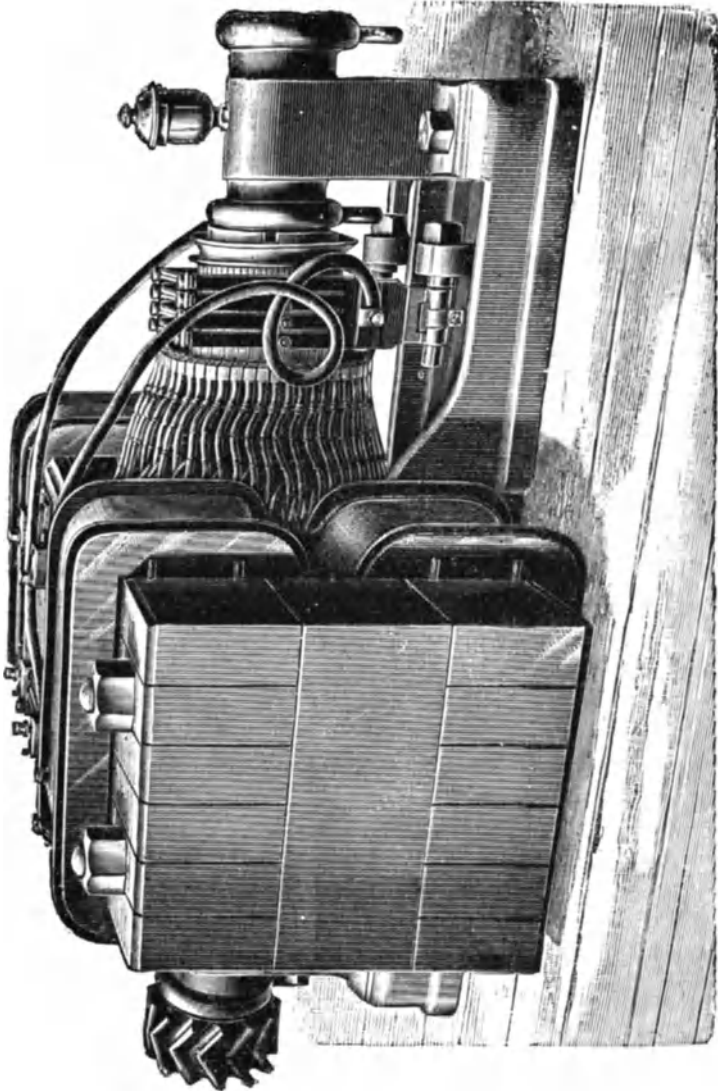


Fig. 114.

stand von einander haben. In letzteren sind starke Speichen befestigt, wie aus Fig. 115 zu ersehen, die eine Cromptonsche Dynamomaschine für 21000 Watt im Querschnitt zeigt. Fig. 116 ist ein Längsschnitt derselben Maschine. Die inneren Kanten der

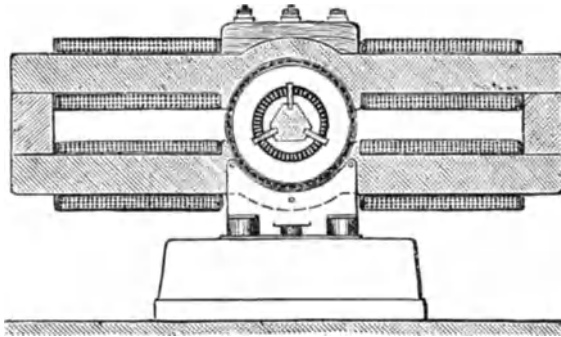


Fig. 115.

Speichen passen in Einschnitte, welche in der Stahlachse angebracht sind; letztere hat dreieckigen Querschnitt und bietet den Speichen genügende Tiefe, ohne dass ihre Festigkeit darunter leidet. Die Eisenscheiben sind abwechselnd auf beiden Seiten

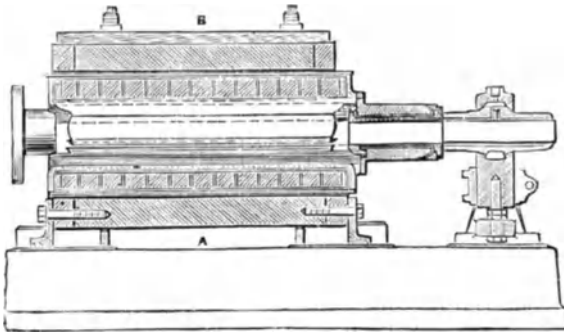


Fig. 116.

mit isolirender Farbe bestrichen, und in bestimmten Abständen sind Zwischenräume zwischen je zwei benachbarten Scheiben gelassen, durch welche der Kern in eine Anzahl verhältnissmässig schmaler Ringe getheilt ist. Diese aus Fig. 116 ersichtlichen Luftkanäle ermöglichen eine gute Kühlung des Ankerkerns. Die Feldmagnete sind doppel-

hufeisenförmig und bestehen aus geraden schmiedeeisernen Platten, die am Joch mit einander verbunden und auf einer gusseisernen Grundplatte durch Träger aus Kanonenmetall befestigt sind. Der Anker der hier abgebildeten Maschine ist, wie auch bei allen anderen von grösseren Dimensionen, nicht mit Draht unwunden, sondern mit Kupferstangen von quadratischem Querschnitt. „The Engineer“ macht folgende Angaben über diese Maschine: Der Ankerkern hat einen Durchmesser von 300 mm, seine radiale Tiefe beträgt 63 mm, seine Länge 700 mm; der Luftzwischenraum zwischen dem Kern und den Polschuhen ist 12 mm lang. Der Querschnitt der Feldmagnete beträgt 112 mm \times 600 mm; die Leiter auf dem Anker haben einen Querschnitt von 7,5 mm \times 4,5 mm, bilden 120 Windungen und sind in gewöhnlicher Weise mit einem 60 theiligen Kommutator verbunden; ihr Widerstand beträgt 0,021 Ohm. Die Maschine ist für eine Stromstärke von 200 Am gebaut und liefert bei 450 Umdrehungen in der Minute eine Spannung von 110 V. Fig. 117 zeigt diese Maschine in direkter Kuppelung mit einer Willans'schen schnelllaufenden Dampfmaschine. Da es für Schiffsbeleuchtung von Wichtigkeit ist, die Achse niedrig zu legen, hat man die Dynamomaschine horizontal angeordnet; ist jedoch nach oben hin genügend Platz vorhanden, so wird die Maschine zuweilen auch nur mit einem einfachen Hufeisenmagneten ausgerüstet und vertikal aufgestellt. Die mit Riemen angetriebenen Maschinen werden für vertikale Aufstellung gebaut.

Die Andrews'sche Dynamomaschine.

Sie ist wegen der eigenartigen Verbindung der Spulen bemerkenswerth. Die vierpolige Maschine hat nur zwei Bürsten, die einander diametral gegenüberstehen. Auf diese Weise sind also nicht, wie gewöhnlich, Punkte gleichen Potentials auf dem Ankerdraht mit einander verbunden, sodass man durch Theilung der Wickelung die doppelte Stromstärke erhält. Es sind die Verbindungen vielmehr derart angeordnet, dass man die gleiche Stromstärke, aber die doppelte elektromotorische Kraft erhält.

Der Unterschied wird am besten aus Fig. 118 zu ersehen sein, wo beide Systeme einander gegenübergestellt sind; links sieht man die Verbindungen für Parallelschaltung, rechts die für Hintereinanderschaltung. Bei der letzten Anordnung muss man eine ungerade Zahl von Spulen anwenden: im allgemeinen 59, der Einfachheit hal-

Additional material from *Elektrische Kraftübertragung*,
ISBN 978-3-642-49443-7 (978-3-642-49443-7_OSFO2),
is available at <http://extras.springer.com>



ber sind jedoch nur 11 abgebildet. Das eine Ende jeder Spule ist mit seinem Kommutatortheil verbunden und das andere nach dem Drahte geführt, der die gegenüberliegende Spule mit dem entsprechenden Kommutatortheil verbindet. So ist das vordere Ende von 1 mit dem hinteren Ende von 2 und mit dem Kommutatortheile 2 verbunden; das vordere Ende von 2 ist mit dem hinteren Ende von 3 und mit dem Kommutatortheile 3 verbunden, u. s. w.; schliesslich ist das vordere Ende von 11 zu dem hinteren Ende von 1 und dem entsprechenden Kommutatortheile geführt. Der Strom tritt an der negativen Bürste in den Anker ein, wo er sich in dem Kommutatortheile 6 in zwei Theile theilt; der eine verläuft um Spule 6, aufwärts an der Aussenseite des Ankers, der

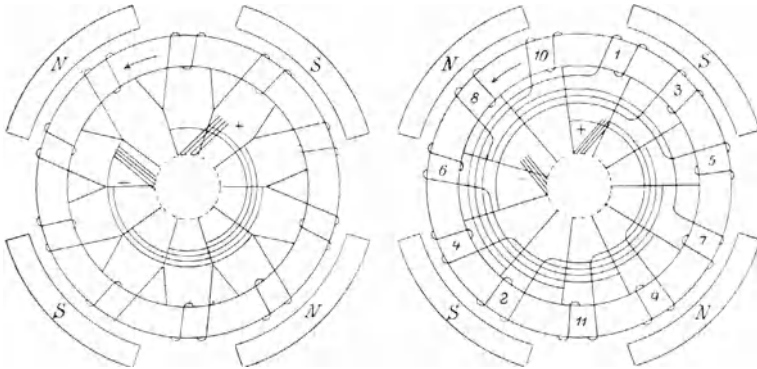


Fig. 118.

andere um Spule 5, abwärts an der Aussenseite des Ankers. Die erste Hälfte des Stromes durchfließt nacheinander aufwärts die Spulen 6, 7, 8 und 9, verlässt den Anker am Segment 10 bei der positiven Bürste, während die zweite nacheinander abwärts die Spulen 5, 4, 3, 2, 1 und 11 durchfließt und den Anker beim Segment 10 verlässt. Hätten wir 59 Spulen, so würde der Strom in ähnlicher Weise in 28 von ihnen aufwärts fließen und in 31 abwärts. Verfolgen wir die Stromrichtung in dem Diagramm, so sehen wir, dass die durch das eine Polpaar erzeugte elektromotorische Kraft zu der durch das andere Polpaar hervorgebrachten addirt wird.

Die Gooldensche Dynamomaschine.

Sie hat verschiedene Entwicklungsstadien durchgemacht. Ursprünglich baute Goolden eine verbesserte Grammesche Maschine,

dann konstruirte er Maschinen mit einfachen Hufeisenmagneten, die nur durch eine Spule erregt wurden (eine dieser Konstruktionen ist noch für Motoren und Generatoren kleinster Grösse beibehalten). Schliesslich nahm er die Maschine mit aufrecht stehendem einfachen Hufeisenmagnete an und betreibt diese sowohl direkt, als auch durch Riemen. Für niedrige Spannungen wird Trommelwicklung verwandt, für hohe Spannungen ist der Grammesche Ring im Gebrauch. Die Feldmagnetkerne sind aus Schmiedeeisen und mit der Grundplatte durch Bolzen verbunden; die Polschuhe sind jedoch von Gusseisen und durch starke Eisenbolzen in den Enden der Kerne befestigt. Fig. 119 zeigt eine Maschine, welche direkt mit einer Brotherhoodschen Dampfmaschine gekuppelt ist und bei 430 Um-

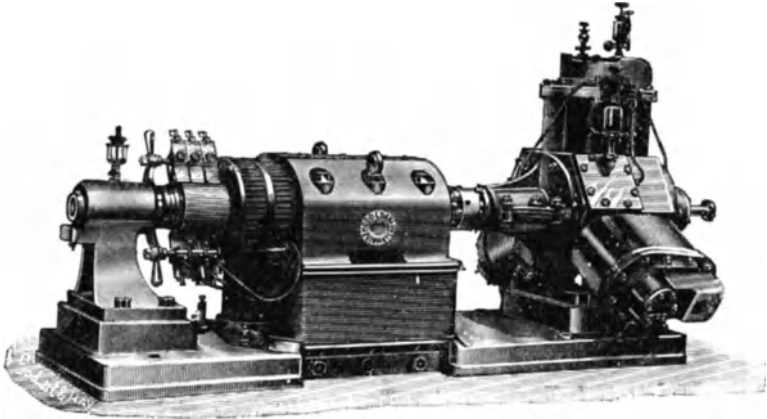


Fig. 119.

drehungen in der Minute einen Strom von 300 Am bei 115 V Spannung liefert. Auf dem Anker, dessen Durchmesser 390 mm beträgt, befinden sich 180 Windungen; ihr Widerstand ist 0,015 Ohm. Die gesammte Induktion beträgt 8600000 C. G. S.- Einheiten. Die gesammte erregende Kraft ist gleich 20000 Ampère-Windungen. Der Zwischenraum zwischen Anker und Polschuhen beträgt 18 mm. Der Widerstand der Nebenschlusswicklung ist gleich 15,8 Ohm, derjenige der Hauptstromwicklung 0,008 Ohm.

Die Gooldenschen Motoren sind von ähnlicher Gestalt; Fig. 120 zeigt einen solchen, welcher für die Fortbewegung von Schiffen bestimmt ist. In dieser Maschine sind Magnetkerne und Polschuhe aus Schmiedeeisen; an den Polschuhen sind gusseiserne Träger ange-

bracht, mit denen der Motor auf dem Schiffsrumpf befestigt ist. Einer der Träger ist nach vorn und hinten verlängert und bildet so die Lagerböcke für die Achse der Maschine. Ein Motor, der auf dem Boden eines Bootes steht, um die Schraube direkt anzutreiben, kann leicht durch Feuchtigkeit beschädigt werden. Um ihn gegen solche Zufälle zu schützen, ist er vollkommen wasserdicht gemacht. Die Zuleitungen zu den Kommutatorsegmenten sind bis zur Oberfläche des Ankers geführt und bilden eine vollständige Scheibe; auf der anderen Seite des Ankers ist eine Scheibe vom Durchmesser des

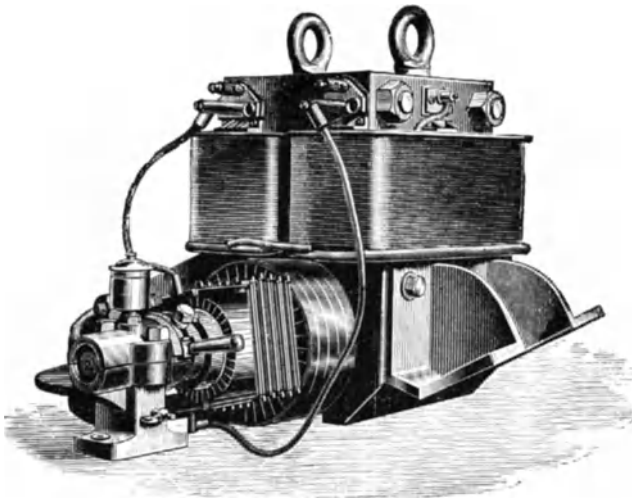


Fig. 120.

letzteren angebracht; die ganze Oberfläche des Ankers ist mit mehreren Lagen wasserdichten Materials bedeckt, über welche die Bindedrähte gelegt sind. Die Verbindung dieser wasserdichten Hülle mit den Endscheiben ist ebenfalls durch Umlegen von Drähten verdichtet. Der gezeichnete Motor hat einen Anker von 20 mm Durchmesser und wiegt 425 kg. Er leistet 5 P.S. bei 500 Umdrehungen in der Minute; der ihm zugeführte Strom beträgt 50 Am; die Spannung an den Bürsten ist 96 V. Die gesammte Induktion ist 2300000 C.G.S.-Einheiten, die erregende Kraft beträgt 15000 Ampère-Windungen; der Luftzwischenraum ist 15,6 mm lang; der Ankerwiderstand beträgt 0,20 Ohm; derjenige der Feldmagnete 14 Ohm.

Die Phönix-Dynamomaschine.

Bei den ursprünglichen Phönix-Maschinen, die von Paterson and Cooper gebaut wurden, bestand das Feld aus einem doppelten Hufeisenmagneten, und der Anker war ein Pacinottischer Ring. Der Ankerkern der späteren Maschinen hat indessen eine glatte Oberfläche, und das Feld bildet ein aufrecht stehender, einfacher Hufeisenmagnet in der jetzt allgemein üblichen Form. Wenn das Gewicht der Maschine keine Rolle spielt, bestehen die Magnete aus Gusseisen, und die beiden Schenkel sind mit einer Bodenplatte A, Fig. 121, aus einem Stück gegossen; mittelst dieser Platte sind sie auf dem eigentlichen Joche befestigt, welches, wie gewöhnlich, einen Theil der Grundplatte bildet. Die grosse Berührungsfläche reducirt den

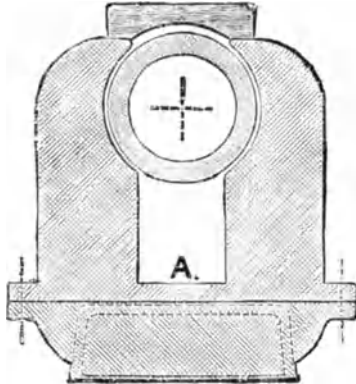


Fig. 121.

magnetischen Widerstand der Verbindungsstelle auf einen äusserst kleinen Betrag. Fig. 122 giebt eine allgemeine Ansicht einer solchen Maschine, die für eine Leistung von 18000 Watt bei 1020 Umdrehungen in der Minute gebaut ist. Der Ankerkern hat einen Durchmesser von 325 mm, seine radiale Tiefe beträgt 50 mm und seine Länge 225 mm. Er ist mit 174 Windungen eines Drahtes von 5 mm Durchmesser bewickelt und mit einem 58 theiligen Kommutator versehen. Der Querschnitt der gusseisernen Magnete ist 225×275 qmm und der Durchmesser der Bohrung in den Polschuhen beträgt 347 mm. Jeder Magnetschenkel hat eine Hauptstromwicklung von 54 Doppelwindungen eines Drahtes von 5 mm Durchmesser; die beiden Wickelungen sind parallel geschaltet. Als Nebenschlusswicklung

sind auf jedem Schenkel 1360 Windungen eines Drahtes von 1,6 mm Durchmesser angebracht; diese beiden Wicklungen sind hintereinander geschaltet. Bei der vollen Belastung von 160 Am und 118 V ist die erregende Kraft der Hauptstromwicklung ungefähr 8500 Ampère-Windungen und diejenige der Nebenschlusswicklung etwa 11500. Der Widerstand vom Anker beträgt 0,033 Ohm; von der Hauptstromwicklung 0,015 Ohm und von der Nebenschlusswicklung 29 Ohm.

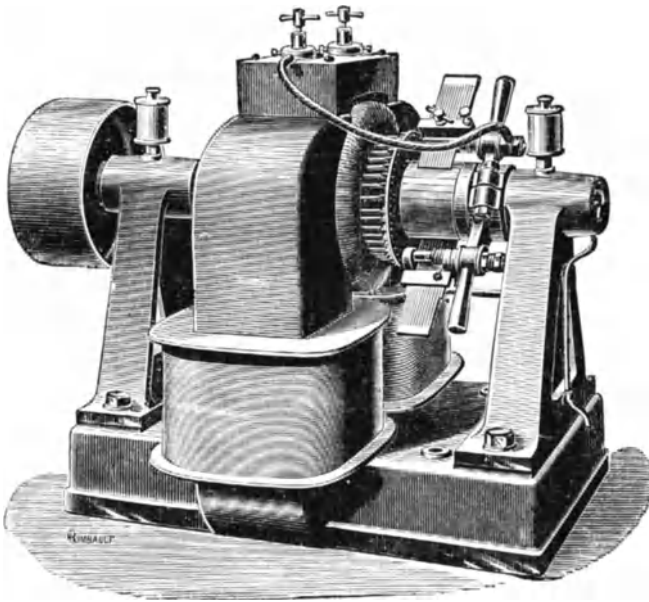


Fig. 122.

Bei Maschinen für hohe Stromstärken verwenden Paterson and Cooper zertheilte Kabel für die Ankerwicklung, um die Foucault'schen Ströme zu vermeiden, die in einem ungetheilten Leiter entstehen würden. Die erste in dieser Weise gewickelte Maschine wurde von dieser Firma vor sechs Jahren gebaut, und seitdem haben andere Fabrikanten bei Anker für hohe Stromstärken gleichfalls zertheilte Kabel angewandt. Ist geringes Gewicht für die Maschine erforderlich, so werden schmiedeeiserne Schenkel gewählt, und die Lager durch Träger aus Kanonenmetall gebildet, welche, wie Fig. 123

zeigt, an den Polschuhen befestigt sind. Anstatt mit einer Grundplatte, ist die Maschine alsdann mit gusseisernen Winkelträgern ausgerüstet, vermittelt derer sie am Boden verschraubt wird. Die folgenden Angaben über eine derartige Maschine sind in der Zeitschrift „Industries“ vom 29. Juli 1887 veröffentlicht. Die Leistung der Maschine ist 100 Am und 250 V, ihre Umdrehungszahl in der Minute 700. Der Ankerkern hat einen äusseren Durchmesser von 350 mm und einen inneren von 200 mm; er ist 300 mm lang und in zwei Lagen mit 360 Win-

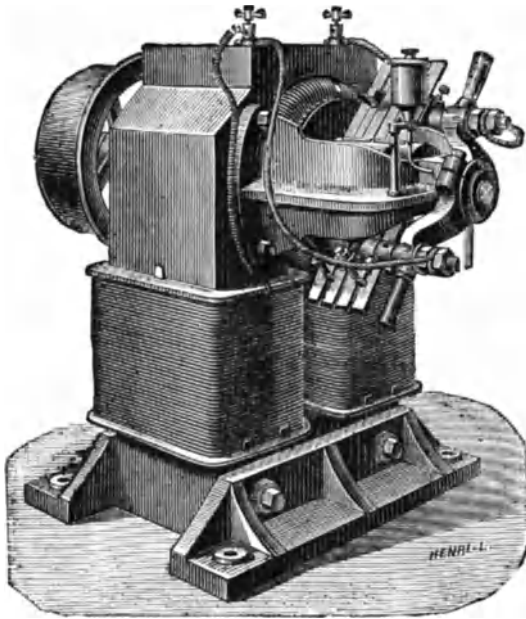


Fig. 123.

dungen eines Drahtes von 3,8 mm Durchmesser bewickelt. Der Querschnitt des Ankerkerns beträgt 3900 qcm. Die Magnetkerne haben einen Querschnitt von 200×300 qmm; der Durchmesser der Bohrung in den Polschuhen beträgt 380 mm. Die Magnete sind mit einer Nebenschlusswicklung versehen; auf jedem Schenkel sind 3540 Windungen eines Drahtes von 1,5 mm Durchmesser angebracht. Der Gesamtwiderstand dieser beiden hintereinander geschalteten Wicklungen beträgt 83 Ohm. Die erregende Kraft ist ungefähr 21000 Ampère-Windungen; die nutzbare Induktion in den Magneten

ist gleich 10200 und im Anker 15800 C.G.S.-Einheiten auf 1 qcm. Das Gesamtgewicht der Maschine beträgt 1400 kg oder für jede Pferdekraft 43 kg.

Die Kappsche Dynamomaschine.

Die Maschine des Verfassers ist eine zweipolige mit einfachem Hufeisenmagnet; der Anker ist für niedrige Spannungen mit

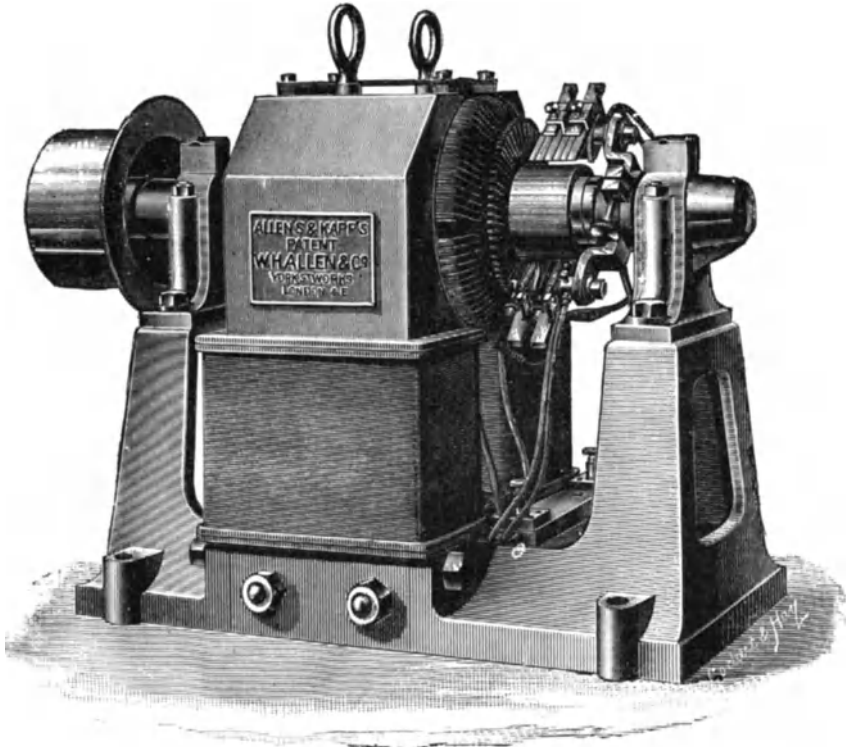


Fig. 124.

Trommelwicklung, für hohe mit Grammescher Wicklung versehen. Der Ankerkern besteht aus dünnen Scheiben von Holzkohleneisen, welche an der Innenseite mit Ausschnitten versehen sind. Vermittelt derselben werden sie an radialen Stangen befestigt, die mit einer Nabe aus einem Stück gegossen sind. Die Stangen und die Nabe haben die gleiche Länge wie der Anker und bilden ein Rohr, das die Festigkeit der Achse erhöht. Um eine Ventilation im Innern des

Kerns zu ermöglichen, sind in bestimmten Abständen Paare von dickeren Scheiben so angebracht, dass die Luft in den Zwischenräumen zwischen diesen Scheiben frei cirkuliren kann. An ihrem äusseren Umfange besitzen letztere eine Anzahl Vorsprünge, die gleichen Abstand von einander haben. Jeder dieser Vorsprünge ist mit Fiber versehen, um die Wickelung von den Scheiben zu isoliren. Die Windungen füllen den Raum zwischen den Vorsprüngen völlig aus, und die Oeffnungen zwischen denselben gestatten der Luft den Eintritt in das Innere des Ankers. Die Vorsprünge dienen aber nicht allein dazu, um eine Ventilation im Innern des Ankers zu ermöglichen, sondern sie haben noch einen anderen wichtigen Zweck. Man sieht leicht, dass die gesammte Nutzarbeit einer Dynamomaschine, mag sie nun als Generator oder Motor wirken, von den Ankerdrähten geleistet werden muss, welche in Folge dessen einer bedeutenden Zugkraft ausgesetzt sind und deshalb so sicher, wie möglich, befestigt werden müssen. Bei kleinen Maschinen mögen zu diesem Zweck die Bindedrähte genügen, aber bei grossen Maschinen reichen sie nicht mehr aus. Der Verfasser verwendet deshalb die eben beschriebenen Vorsprünge zur sicheren Befestigung der Ankerdrähte.

Fig. 124 zeigt eine der Maschinen des Verfassers für Riemenbetrieb. Die Magnete aus geglühtem Schmiedeeisen sind auf dem Boden des Joches verschraubt, welches mit der Grundplatte aus einem Stück gegossen ist. Der Querschnitt des Jochs ist um etwa 40% grösser als derjenige der Magnetkerne, sodass auf diese Weise der höhere magnetische Widerstand des Gusseisens ausgeglichen ist. Die Polschuhe bilden mit den Magnetkernen ein Stück, aber an ihre oberen und unteren Ecken sind gusseiserne Streifen geschraubt, welche kleine Erweiterungen der Polflächen bilden. Der Zweck dieser Anordnung ist ein doppelter. Erstens wird durch die so erhaltene Vergrösserung der Polflächen der magnetische Widerstand des Luftzwischenraums verringert, und es ist in Folge dessen eine geringere erregende Kraft erforderlich. Zweitens vermitteln die dünnen Kanten der Eisenstreifen einen allmählichen Uebergang zwischen dem äusserst kräftigen Felde der Polschuhe und der neutralen Zone, sodass die Leiter allmählich in den Wirkungsbereich des Feldes hineingeführt werden. Bei den Maschinen, in denen plötzliche Veränderungen der Feldstärke stattfinden, ist die Gefahr vorhanden, dass in den massiven Leitern beim Erreichen und Verlassen des Feldes

sehr starke Foucaultsche Ströme entstehen. Durch Verwendung dieser gusseisernen Vorsprünge an den Polschuhen wird diese Gefahr zum grössten Theil, oder sogar vollständig beseitigt. Der Verfasser hat Maschinen, deren Anker mit Leitern von 81 qmm Querschnitt versehen waren, laufen lassen, ohne aus diesem Grunde die geringste Erwärmung entdecken zu können. Die nutzbare Induktion im

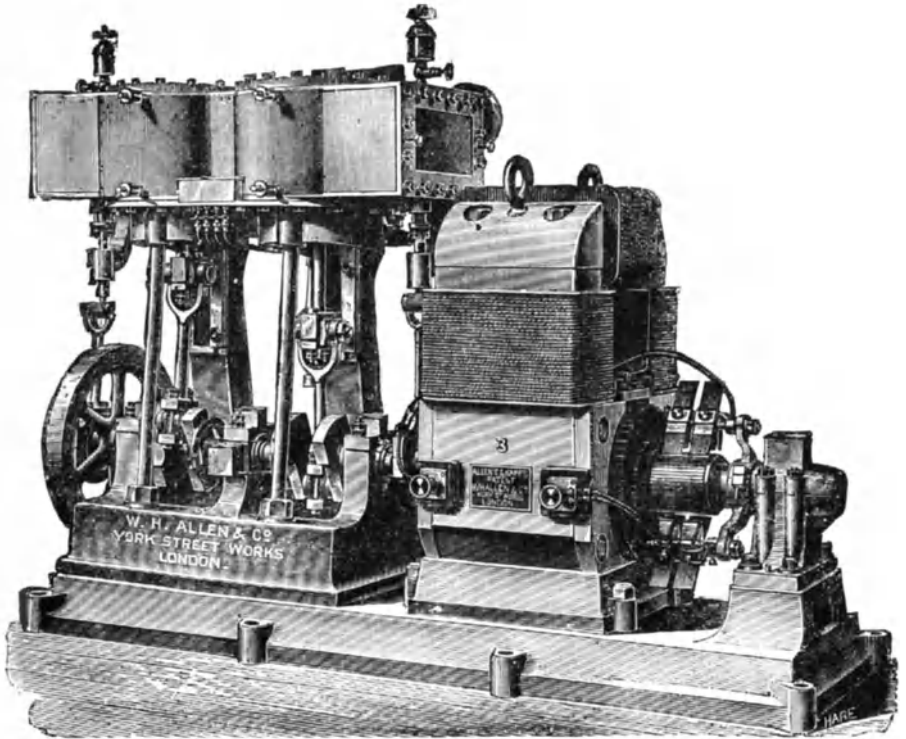


Fig. 125.

Ankerkern beträgt 19000 und in den Magnetkernen 12000 C.G.S.-Einheiten auf 1 cm.

Um die Dynamomaschinen direkt anzutreiben, verwendet der Verfasser die in Fig. 125 gegebene Anordnung, welche die gewöhnliche von W. H. Allen und Comp. gebaute Dampfdynamomaschine darstellt. Für niedrige Spannungen wird Trommelwicklung verwendet; der Leiter besteht theilweise aus Kupferstangen (auf der

äusseren Fläche des Ankers), theilweise aus dünnen, halbkreisförmigen Kupferstreifen (an den Stirnflächen des Ankers). Die einzelnen Kupferstreifen sind untereinander so verbunden, dass sie, falls einer derselben schadhaft werden sollte, leicht herausgenommen und ersetzt werden können, ohne dass man die übrigen Theile der Wickelung zu beschädigen braucht.

Die Brownsche Dynamomaschine.

Die Maschinen, welche von der Maschinenfabrik Oerlikon in der Schweiz nach den Angaben ihres Ingenieurs Brown gebaut werden, sind vielfach für Zwecke der elektrischen Kraftübertragung im Gebrauch. Da im letzten Kapitel nähere Einzelheiten über einige der von Brown ausgeführten Anlagen folgen werden, so ist hier nur eine allgemeine Beschreibung der Maschinen erforderlich. Sie werden je nach dem Zwecke, welchem sie dienen sollen, in verschiedenen Typen hergestellt, von denen die hauptsächlichsten im Folgenden beschrieben werden. Für kleinere und mittlere Leistungen hat das Feld die Form des Manchester-Typus; der Anker besitzt eine Grammesche Ringwicklung, deren wirksame Leiter auf dem Mantel des Ringes liegen. Sollen starke Ströme erzeugt werden, so sind an der Oberfläche des Ringes mit Hartfiber ausgelegte Bohrungen angebracht, durch welche die Leiter, in diesem Falle starke Kupferstangen, geführt sind. Die inneren, für die Induktion unwirksamen Leiter, sind flache Kupferstücke, welche durch ausgehöhlte, hölzerne Ringe befestigt und isolirt sind. Für kleinere, direkt angetriebene Maschinen hat Brown ein vierpoliges Feld angenommen, welches jedoch nur durch zwei erregende Spulen erzeugt wird. Der Anker ist mit Trommelwicklung versehen, und die Bürsten sind so geschaltet, dass sich die zwischen je zwei derselben erzeugten Spannungen addiren. Bei grossen Maschinen hat das Feld die in Fig. 48 abgebildete Form. Der Anker war bei den älteren Maschinen als Ring gewickelt; bei den neueren wird jedoch eine besondere Trommelwicklung angewandt, welche die Erzeugung von Spannungen bis 1000, ja sogar 2000 Volt ermöglicht und in Bezug auf Isolation eine Sicherheit gewährt, die bei einer gewöhnlichen Trommelwicklung nicht erreicht werden kann.

Die Dynamomaschinen von Siemens und Halske.

Die Verdienste der Firma Siemens und Halske um die Vervollkommnung der Dynamomaschinen sind allgemein bekannt. Mit der Entdeckung des dynamoelektrischen Principes durch Werner von Siemens wurden die Dynamomaschinen für die Zwecke der Technik verwerthbar. Seitdem sind soviel verschiedene Typen von Siemens'schen Maschinen konstruirt worden, von denen ein jeder eine Ver-

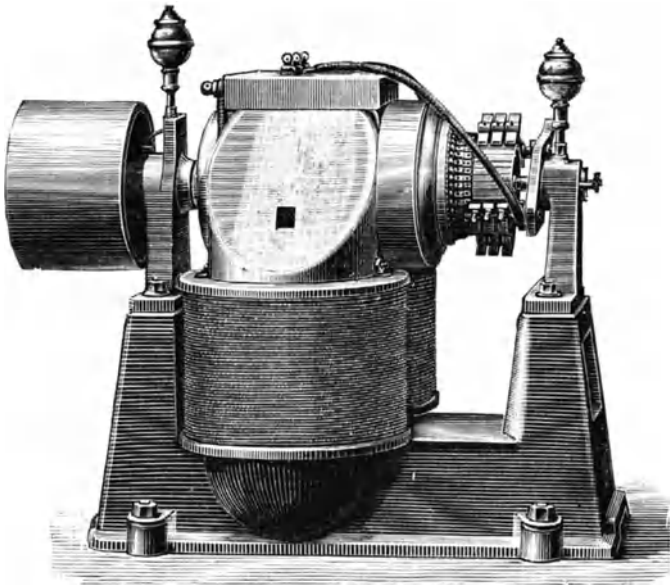


Fig. 126.

vollkommnung des früheren war, dass wir uns darauf beschränken müssen, die zur Zeit hauptsächlich benutzten kurz zu beschreiben.

Für Kraftleistungen bis etwa 200 P.S. werden meistens die sogenannten H-Maschinen gebaut. Das Magnetsystem wird hier, wie Fig. 126 zeigt, aus einem einfachen, aufrecht stehenden Hufeisenmagneten gebildet und ist mit der Grundplatte und den Lagerböcken aus einem Stück gegossen. Der Querschnitt der Magnetschenkel ist unten kreisförmig, an den Polen sind jedoch die Schenkel durch Flächen, die in schräger Richtung von Aussen nach Innen zur oberen Kante der Pole verlaufen, abgeflacht. Der Anker ist in

der üblichen Weise aus Scheiben weichen Eisens zusammengesetzt, die auf der Achse senkrecht stehen, und mit einer Trommelwicklung versehen. Der Kollektor wird bei den neueren Siemens'schen Maschinen vielfach aus gusseisernen Segmenten zusammengesetzt, welche bei völlig ausreichender Leitungsfähigkeit eine grössere Haltbarkeit besitzen. Die einzelnen Segmente sind mit ihrem einen Ende isolirt auf der einen Stirnfläche des Ankers befestigt, mit dem anderen ragen sie frei in die Luft hinein und bilden so einen Kranz um die Achse der Maschine. Die Isolation zwischen den einzelnen Segmenten wird durch die Luft gebildet. Diese Anordnung ist nur durch die Wahl von Gusseisen als Material für den Kollektor möglich geworden, da dies grössere Festigkeit als das sonst gebräuchliche Kupfer besitzt. Sie hat ausserdem den Vortheil, dass etwa von den Bürsten sich loslösende Kupfertheilchen keinen Kurzschluss zwischen benachbarten Segmenten bilden können, sondern durch die Centrifugalkraft aus den Luftzwischenräumen herausgeschleudert werden. Die Maschinen sind in grosser Anzahl gebaut, jedoch schon von einem neueren Modell übertroffen, bei welchem die Polschuhe nicht abgeflacht sind. Ferner ist hier der Querschnitt der Magnetschenkel nicht rund, sondern fast halbkreisförmig, wobei die ebene Fläche jedes Schenkels nach innen, die gewölbte nach aussen liegt.

Für grosse Kräfteleistungen, speciell für direkten Antrieb, baut die Firma Siemens und Halske schon seit dem Jahre 1887 Innenpolmaschinen. Die beigegefügte Tafel (Fig. 127) giebt die Ansicht einer solchen. Sie sind in den Berliner Beleuchtungscentralen mehrfach in Gebrauch und dort mit der Dampfmaschine direkt gekuppelt. Fig. 127a zeigt zwei vertikale Querschnitte; der eine verläuft in der Richtung der Achse, der andere senkrecht zu derselben. Die Achse der Dampfmaschine ist bis zu einem dritten in der Figur abgebildeten Lager geführt, und auf dem verlängerten Theil derselben der Anker mit Hilfe dreier um 120 Grad versetzter Keile befestigt. Das gusseiserne Sechskant, welches die sechs Feldmagnete trägt, ist mit seinen angegossenen Flanschen an den mittleren kräftig gestalteten Lagerbock angeschraubt; in der Mitte ist es ausgehöhlt, um für die Welle und die Nabe des Ankers den nöthigen Platz zu lassen. Die schmiedeeisernen Schenkel haben quadratischen, an den Ecken abgerundeten Querschnitt, sind mit ihren sorgfältig abgefrästen Flächen an dem Sechskant verschraubt und mit schmiedeeisernen Polschuhen versehen. Die Wicklung

Additional material from *Elektrische Kraftübertragung*,
ISBN 978-3-642-49443-7 (978-3-642-49443-7_OSFO3),
is available at <http://extras.springer.com>



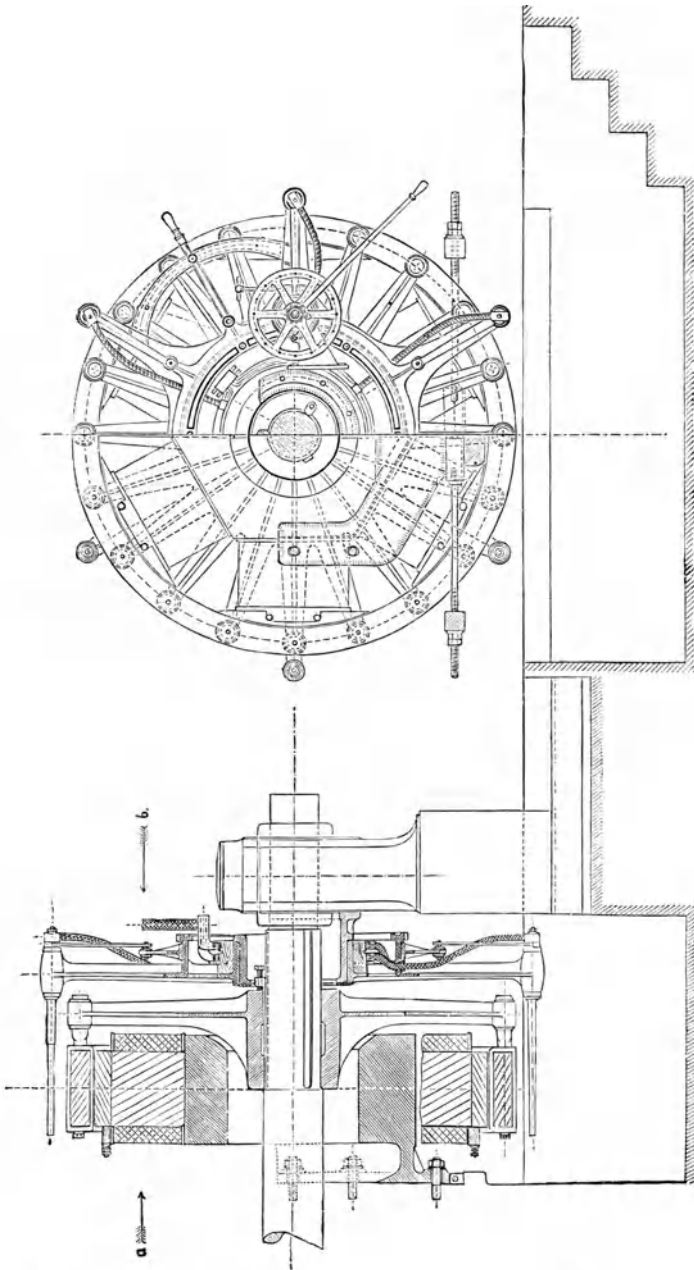


Fig. 127 a.

der Schenkel ist auf besonderen Holzkästen angebracht, die nach Entfernung der Polschuhe leicht abgezogen werden können.

Der Ankerkern ist aus Eisenblechsegmenten gebildet, welche mit versetzten Stössen auf einander geschichtet und durch Papier von einander isolirt sind. Sie werden durch zwanzig vom Ankereisen isolirte Rothgussbolzen zusammengehalten und getragen, welche wieder in die Speichen des gusseisernen Ankersterns eingepasst sind. Letzterer besteht aus einer kräftigen Nabe und zwanzig durch Rippen versteiften Speichen mit grossen endständigen Augen. Die Ankerwicklung ist aus Flachkupferstäben hergestellt, welche in der Regel mit der hohen Kante gegen den gut isolirten Eisenkern gestellt sind. An der äusseren Seite des Ringes, wo die Stromabnahme stattfindet, sind die Stäbe stärker gehalten und in Riemen aus Pressspahn gelegt, welcher die Isolation zwischen ihnen bildet. In Folge dieser Anordnung bleibt die Wicklung aussen blank und dient unter Fortfall eines besonderen Kollektors als Stromabgeber. Die Kupferstäbe werden vorher richtig gebogen, an den beiden Enden flach gepresst und mit Isolation versehen. Sodann werden sie auf den Ankerkern gebracht und mit den geraden Kollektorstäben vernietet und verlöthet.

Der Bürstenhalter besteht aus einem dem Ankerstern ähnlichen Stern mit sechs Speichen und ist mit einem cylindrischen, gusseisernen Körper verbunden, welcher an dem dritten Lagerbock verschraubt ist. Mittelt einer Zahnradübertragung kann er beliebig um die Achse der Maschine verschoben werden. Die Speichen tragen in endständigen Augen die in Isolirbuchsen drehbaren Rothgussbolzen, auf welche die Bürstenhalter geschoben werden. Von den hinteren Enden dieser Bolzen führen starke Kupferlitzen den Strom zu zwei Sammelringen aus Rothguss, welche isolirt auf der Nabe des Bürstenhalters angebracht sind. Vermittelt einer besonderen Vorrichtung können sämtliche Bürsten gleichzeitig aufgelegt und abgehoben werden.

Die Vortheile dieses Maschinen-Typus sind leicht einzusehen. Der von den Kraftlinien beschriebene Weg ist bei der Anordnung des Magnetsystems sehr kurz, und eine Streuung bei der radialen Stellung der Schenkel fast ausgeschlossen. Mit verhältnissmässig geringen magnetisirenden Kräften wird daher schon eine bedeutende Anzahl wirksamer Kraftlinien erzielt. Durch die Verlegung des Ankers nach Aussen erreicht man bei einer bestimmten Gesamt-

grösse der Maschine und einer gegebenen Umlaufzahl die höchste Drahtgeschwindigkeit. Man ist daher im Stande, schon bei geringer Umdrehungszahl hohe elektromotorische Kräfte im Anker zu erzielen, sodass eine direkte Kuppelung mit Dampfmaschinen von etwa 80—100 Umdrehungen in der Minute möglich wird. Die grössere Anzahl der Magnetpole, welche bei den Maschinen für stärkere Leistungen stets gewählt wird, gestatten in Folge der vermehrten Anzahl der Abnahmestellen, sehr starke Ströme aus der Maschine abzuführen, ohne dass eine Erwärmung des Kollektors oder der Bürsten zu befürchten wäre. Die Ausbildung des Ringes zum Kollektor hat, von der Ersparniss an Raum und Kosten abgesehen, auch grosse Vortheile in elektrischer Beziehung. Zunächst wird durch diese Anordnung der innere Widerstand der Maschinen bedeutend erniedrigt; sodann ist durch die weitgehende Theilung des Kollektors und durch den Umstand, dass zwischen je zwei Kollektorsegmenten nur eine Windung liegt, eine beinahe ideale Dynamomaschine geschaffen worden. Die Herstellung der Maschinen, besonders die sichere Befestigung des aus dünnen Blechen gebildeten Ankerkerns auf der Welle, hat einige mechanische Schwierigkeiten; sie sind jedoch als überwunden zu betrachten, nachdem eine grosse Anzahl dieser Maschinen seit Jahren ohne Störung in Betrieb ist.

Bei den grössten bislang ausgeführten Maschinen dieses Typus beträgt der Durchmesser des Magnetsystems 136 cm. Sie sind für eine Leistung von 140 V und 2600 Am gebaut, erfordern bei 64 Umdrehungen in der Minute eine Betriebskraft von etwa 500 P.S. und sind in den Berliner Beleuchtungscentralen zu je zweien mit Dampfmaschinen von 1000 P.S. kombinirt. An die Lagerböcke der letzteren werden die Feldmagnete verschraubt; die Anker sitzen rechts und links auf der verlängerten Kurbelwelle, welche an ihren Enden in zwei weiteren Lagerböcken gehalten wird. Die Maschinen sind deshalb hier so eingehend behandelt worden, weil sie jedenfalls auch später für die elektrische Kraftübertragung von grosser Bedeutung sein werden. Wenn die Elektromotoren in den grossen Städten für das Kleingewerbe mehr Anwendung gefunden haben, und zu ihrem Betriebe starke Ströme nöthig sein werden, wird man sie zweckmässig an ein grosses Netz anschliessen, welches auch Ströme für Beleuchtung und andere Zwecke liefert und das von wenigen grossen Maschinen gespeist wird.

Für geringe Leistungen baut die Firma Siemens & Halske den in Fig. 128 abgebildeten kleinen Motor, der zum Anschluss an das Beleuchtungsnetz bestimmt ist. Das Magnetsystem besteht hier aus einem horizontalliegenden Stück, welches die Wicklung trägt und an jedem Ende mit einem Polschuh versehen ist. Die Innenflächen der Polschuhe bilden einen fast geschlossenen Cylindermantel, der nur oben und unten durch einen kleinen Zwischenraum unterbrochen ist. In diesem Hohlraum rotirt der als Grammescher Ring gewickelte Anker. Da der Motor nur für geringe Kraftleistungen bis zu 1 P.S. bestimmt ist, konnte man die

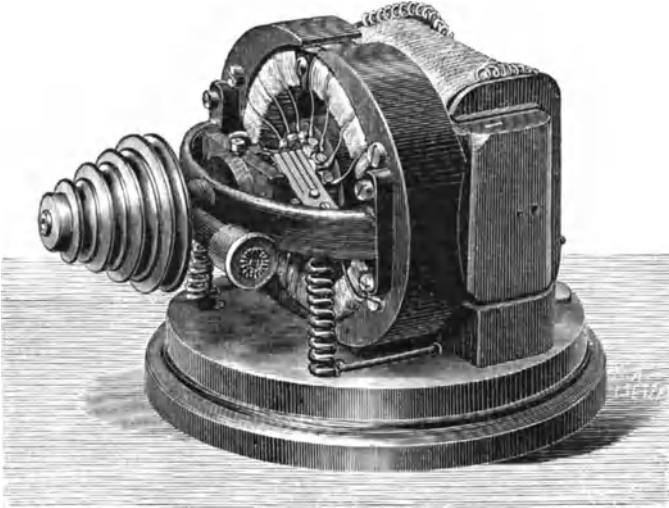


Fig. 128.

Ankerwelle in nur einem Lager laufen lassen, welches von einem die beiden Polschuhe verbindenden Querstück getragen wird. Das Magnetsystem und die Grundplatte sind aus einem Stück gegossen; der Elektromotor nimmt äusserst wenig Platz ein und kann überall leicht aufgestellt werden.

Die Schuckertschen Dynamomaschinen.

Die Firma Schuckert & Co. baut schon seit dem Jahre 1876 die bekannten Flachring-Dynamomaschinen. Das Feld derselben bilden zwei oder mehrere hufeisenförmige Magnete, welche mit gleichen Polen einander zugekehrt sind und zwischen denen der

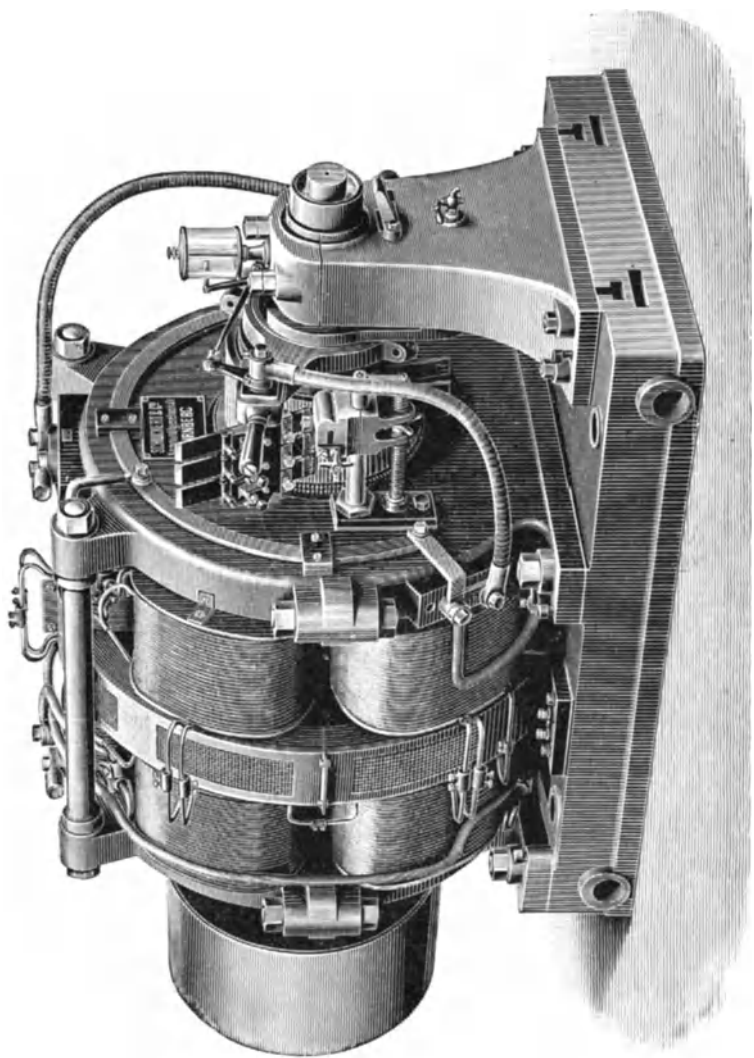


Fig. 129.

Ring um die den Magnetschenkeln parallele Achse rotirt. Die Kraftlinien treten hier also in einer zur Achse parallelen Richtung in den Anker ein, und die von der Achse aus radial verlaufenden Theile der Ankerwicklung sind der Sitz der elektromotorischen Kraft der Maschine. Diese Anordnung hat vor den üblichen Cylinder- und Trommelankern den Vortheil, dass bei verhältnissmässig geringer Umdrehungszahl bereits eine hohe lineare Geschwindigkeit der Ankerdrähte erzielt wird. Ferner ist ein Schleifen der

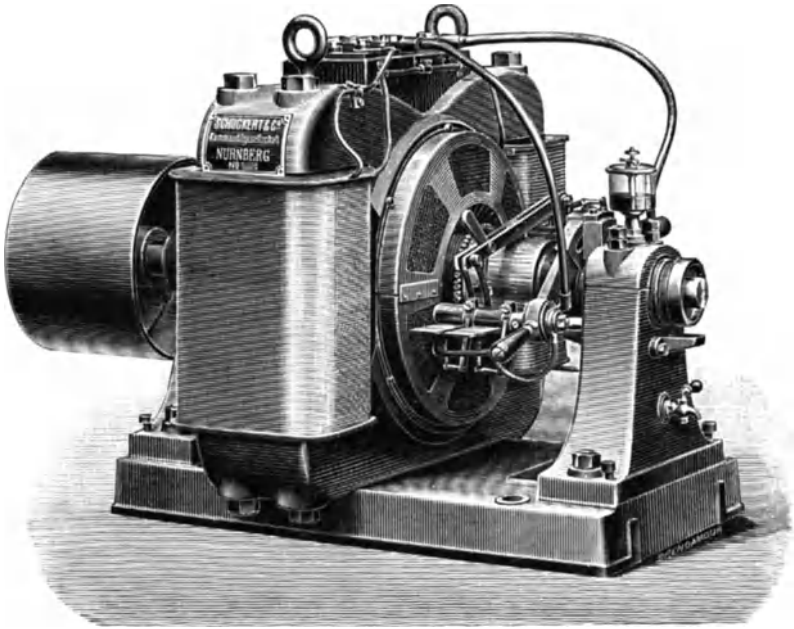


Fig. 130.

letzteren an den Polflächen durch die fast unvermeidlichen, senkrecht zur Achse erfolgenden Schwankungen der Welle ausgeschlossen. Die gesammte Konstruktion der Maschinen, der eine langjährige Erfahrung zu Grunde liegt, ist äusserst solide. Fig. 129 bringt die Ansicht einer vierpoligen Maschine dieses Systems. Die Magnete sind mit der Grundplatte, den Ständern und den Traversen durch starke Verschraubungen zu einem festen Ganzen vereinigt. An die Ständer sind die Lager angegossen, in deren Schalen aus Weissmetall die langen Zapfen der stählernen Ankerachse laufen. Der

Ankerkern ist aus dünnen Scheiben schwedischen Eisens hergestellt und gut zertheilt, sodass ein Entstehen von Foucaultschen Strömen ausgeschlossen ist. Bei kleineren zweipoligen Maschinen ist der Anker ohne weiteres seitwärts herauszunehmen; bei den grösseren mehrpoligen ist das Maschinengestell durch eine Schnittfläche derartig getheilt, dass zuerst die obere Hälfte abgenommen und sodann der Anker entfernt werden kann. Die Maschinen werden in verschiedenen Grössen gebaut und haben je nach dem Umfange des Ringes eine grössere oder geringere Anzahl von Feldmagneten. Das grösste Modell liefert bei 300 Umdrehungen in der Minute 110 V und 1200 Am, erfordert bei voller Belastung eine Betriebskraft von 200 P.S. und wiegt 9000 kg.

Neuerdings verfertigen Schuckert & Co. auch eine Dynamomaschine vom Manchester - Typus, die in Fig. 130 abgebildet ist. Die Elektromagnete bilden hier ein aufrecht stehendes, geschlossenes Viereck, innerhalb dessen der Cylinderringanker rotirt. Die niedrige Lagerung der Achse, sowie der gesammte gedrungene Bau dieser Maschine befähigen sie ganz besonders zur Verwendung auf Schiffen. Der Raumparsniss halber wird sie hier direkt mit der treibenden Dampfmaschine gekuppelt, sodass ein Lager in Wegfall kommen kann.

Die Dynamomaschinen der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft.

Unter den verschiedenen Maschinentypen, die von der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft gebaut werden, ist derjenige wegen seiner grossen Verbreitung besonders erwähnenswerth, welcher durch vier von einem ringförmigen Polgehäuse radial nach innen verlaufender Magnetkerne gekennzeichnet ist. Fig. 131 bringt eine Abbildung dieser Maschine. Die Magnetkerne haben kurze, gedrungene Gestalt und sind mit dem Polgehäuse, der Grundplatte und den Lagerböcken aus einem Stück gegossen. Durch die ausschliessliche Verwendung von Gusseisen wird das Gesamtgewicht der Maschine für eine bestimmte Leistung allerdings etwas grösser; der Nachtheil dieser geringen Gewichtszunahme wird jedoch durch die leichte Herstellbarkeit der Maschine wieder aufgehoben. Charakteristisch für das Magnetsystem der Maschinen der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft ist die Verwendung der sogenannten „Polbuchse“. Es ist dies ein starker gusseiserner Hohlcyylinder, welcher die Pole der Elektromagnete mit einander verbindet und so die von ihnen gebil-

deten magnetischen Felder allmählich in einander übergehen lässt. Wenn auf diese Weise auch ein grösserer Theil der in den Feldmagneten erzeugten Kraftlinien für die Induktion im Anker verloren

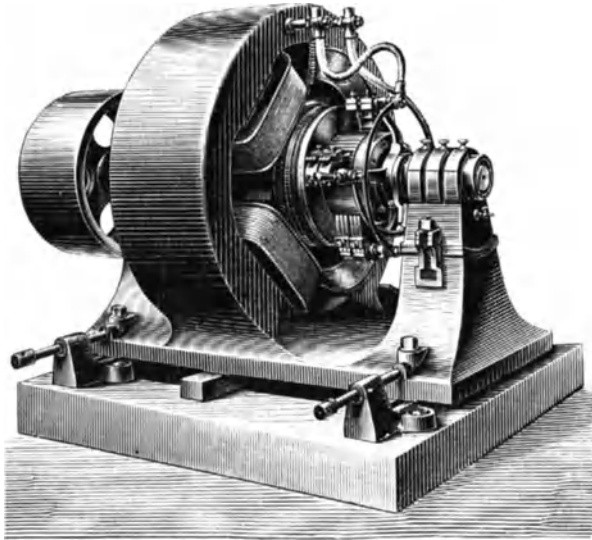


Fig. 131.

geht, so wird auf der anderen Seite durch diese Anordnung erreicht, dass sich der Uebergang der Spulen von dem einem Felde in das benachbarte ganz allmählich vollzieht und zu keiner nachtheiligen

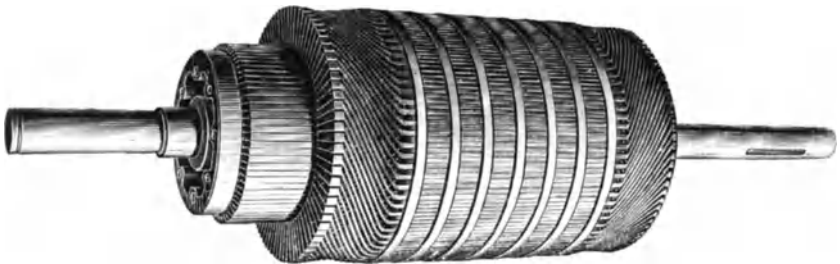


Fig. 132.

Funkenbildung auf dem Kollektor Veranlassung giebt. Eine ähnliche Einrichtung ist bei Beschreibung der Kappschen Dynamomaschine angegeben. Der in Fig. 132 abgebildete Anker dieser Maschinen

ist aus ringförmigen, schmiedeeisernen Blechscheiben gebildet, welche auf einer gusseisernen Hohltrummel befestigt sind. Diese Trummel wird durch kräftige Speichen von zwei Naben getragen und vermittelst der letzteren mit der Achse starr verbunden. Eine kräftige Ventilation ist dadurch erreicht, dass die Speichen den Flügeln eines Ventilators nachgebildet sind; der bei der Rotation des Ankers im Inneren der Gusstrummel entstehende Luftstrom kann durch Ausparungen, die den Mantel der letzteren durchbrechen, direkt die Ankerbleche bestreichen. Ein Uebertritt der Kraftlinien in den gusseisernen Theil der Trummel findet wegen der geringen Sättigung des schmiedeeisernen Theiles nicht statt, und damit ist eine schädliche Erwärmung der ersteren ausgeschlossen. Der Anker ist mit einer Art Trummelwicklung versehen, die aus einer Lage rechteckiger Kupferstäbe besteht. Diese sind an dem einem Ende mit dem Kollektor verlöthet, an dem anderen Ende untereinander, sodass hier eine Art Gitter entsteht, durch welches die Luft ungehindert in das Innere des Ankers eintreten kann. Es ermöglicht diese Anordnung eine sorgfältige Isolation der einzelnen auf dem Anker befindlichen Leiter von einander und eine leichte Auswechslung derselben, wenn einer von ihnen beschädigt werden sollte. In Fig. 132 ist ein solcher Anker abgebildet, der für eine Leistung von 120 V und 600 Am bestimmt ist. Am Kollektor wird der Strom den vier Magneten entsprechend vermittelst vier Bürsten abgenommen, von welchen je zwei gegenüberliegende durch starke Kupferstäbe parallel geschaltet sind.

Die Maschinen werden in verschiedenen Grössen für Leistungen von 18000 bis 72000 Watt mit einer Umdrehungszahl von 900 bis 500 in der Minute hergestellt. Sie haben alle reine Nebenschlusswicklung auf den Magneten. Die folgenden Angaben über eine derartige Maschine für eine Leistung von 120 V und 300 Am wurden von der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft gütigst mitgetheilt. Sie hat ein Gesamtgewicht von etwa 2400 kg, läuft mit 700 Umdrehungen in der Minute und verbraucht bei normaler Leistung 55 P.S. Der Widerstand der Ankerwicklung beträgt etwa 0,014 Ohm, derjenige der Wicklung auf den Feldmagneten 20 Ohm. Bei voller Belastung hat die Maschine einen Wirkungsgrad von 90%; wird sie nur zum dritten Theil ausgenutzt, so beträgt der Wirkungsgrad noch über 80%.

Für geringere Leistungen bis etwa 10000 Watt baut die ge-

nannte Gesellschaft zweipolige Maschinen von der in Fig. 133 dargestellten Form. Die Magnetkerne sind auch hier mit dem Polgehäuse und den Lagerböcken aus einem Stück gegossen. Die Maschinen laufen mit bedeutend höherer Geschwindigkeit als die zuerst beschriebenen; die grössten machen 1000 Umdrehungen in der Minute. Sie haben im Verhältniss zu ihrer Leistung ein geringes Gewicht und nehmen wenig Raum ein; aus diesen Gründen sind sie ausserordentlich viel als Motoren für kleine Kraftleistungen in Gebrauch gekommen.

Sollen grössere Mengen von elektrischer Energie erzeugt werden,

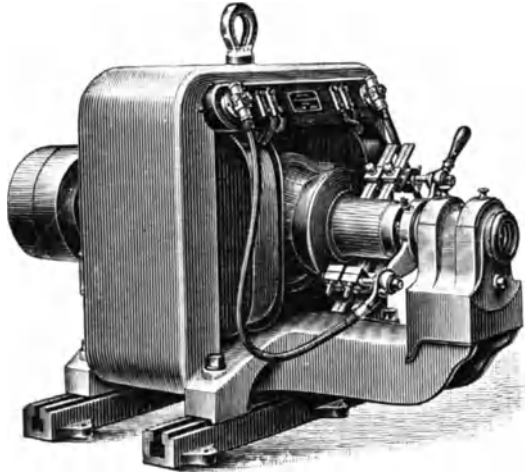


Fig. 133.

so verwendet die Gesellschaft vielpolige Maschinen. Fig. 134 zeigt eine solche mit zwölf Polen. Die Magnetschenkel sind auch hier wie bei der Siemens'schen Innenpolmaschine radial um die Achse angeordnet; aber der Anker rotirt nicht ausserhalb derselben, sondern in dem von ihnen eingeschlossenen Raume; man spricht daher in diesem Falle auch wohl von Aussenpolmaschinen. Die äusseren Enden der Schenkel sind durch einen schweren eisernen Ring verbunden, welcher mit der Grundplatte verschraubt ist. Der Anker besitzt Ringwicklung und ist zur Stromabnahme mit einem aus vielen Segmenten bestehenden Kollektor von grossem Durchmesser versehen. Der Bürstenhalter ist ähnlich eingerichtet wie

bei der Siemens'schen Innenpolmaschine. Ein Vergleich der Aussen- mit den Innenpolmaschinen dürfte sowohl in magnetischer Beziehung als ganz besonders in elektrischer zu Ungunsten der ersteren ausfallen; diese können auch nicht zur Entwicklung so grosser Kraftleistungen verwandt werden. Die bislang hergestellten Maschinen dieses Typus sind für 120 V und 550 Am bei etwa 230 Umdrehungen in der Minute bestimmt; die hierfür nothwendige Betriebskraft beträgt etwa 100 P.S.

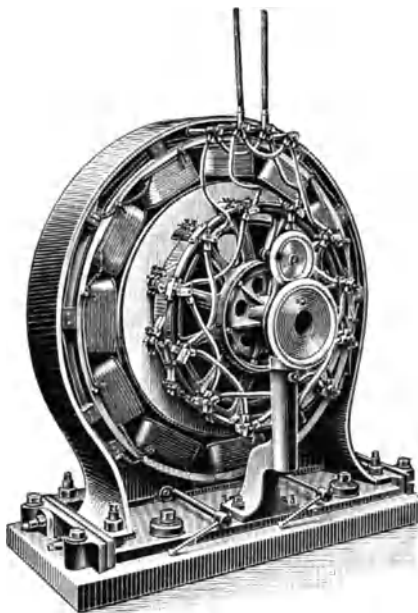


Fig. 134.

Die Dynamomaschine der Deutschen Electricitäts-Werke.

Die Deutschen Electricitäts-Werke zu Aachen (Garbe, Lahmeyer & Co.) bauen seit dem Jahre 1886 eine Dynamomaschine, die besonders wegen der Gestaltung des Magnetsystems bemerkenswerth ist. Sie war einer der ersten in Deutschland, bei deren Konstruktion die Ergebnisse der Kappschen Theorie verwerthet, und durch Anwendung grosser, magnetisch schwach gesättigter Eisenmassen ein Modell mit niedrigem magnetischen Widerstande und geringer Streuung der Kraftlinien geschaffen wurde. In Folge dieser

Eigenschaften ist die magnetische Rückwirkung der Ankerströme kaum bemerkbar. Fig. 135 und 136 zeigen diese Maschine in Querschnitt und Seitenansicht. Das ganze Magnetsystem ist aus einem

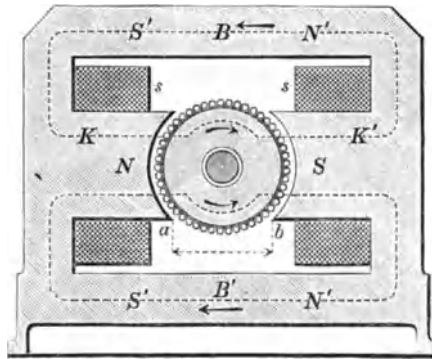


Fig. 135.

Stück gegossen; die beiden einander gegenüberstehenden Magnetkerne sind kurz und kräftig gehalten und durch starke Platten, welche um die Magnetspulen herumgeführt sind, mit einander verbunden.

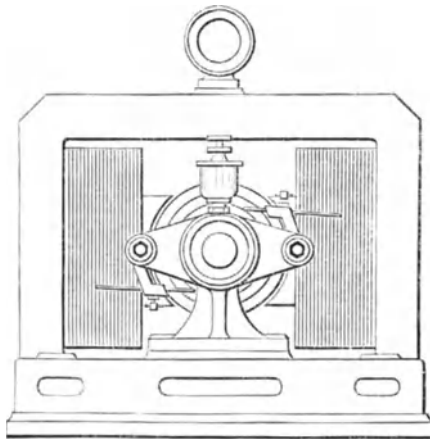


Fig. 136.

Der Anker ist aus dünnen Scheiben weichen Eisenblechs zusammengesetzt, welche durch Papier von einander isolirt sind und mittelst vier isolirter Streben zusammengehalten werden. Zwischen je 10 bis

15 solcher Scheiben sind Zwischenräume gelassen, durch welche ein Luftstrom aus mehreren an der Achse verlaufenden Kanälen nach Aussen hin cirkuliren kann. Der Anker besitzt eine Trommelwicklung; jede Spule besteht nur aus wenigen Windungen; die Anzahl der Spulen und dementsprechend auch diejenige der Kollektor-

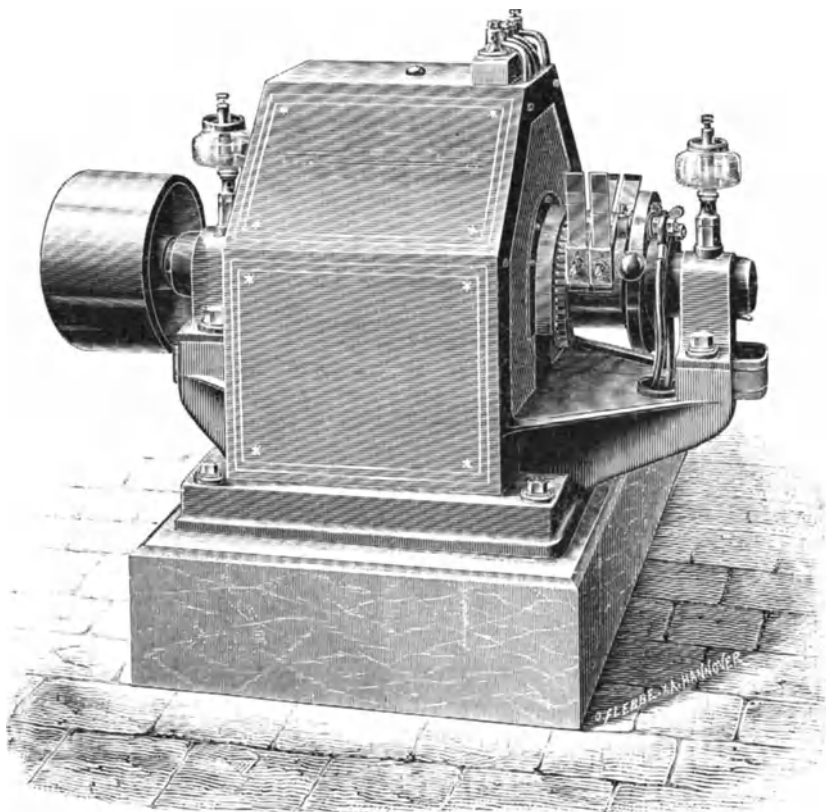


Fig. 137.

segmente ist möglichst hoch gewählt. Die Ankerwicklung ist vor äusserer Beschädigung durch perforirte Bleche geschützt, die vorn und hinten am Magnetsystem angebracht sind und nur die Riemenscheibe und den Kollektor frei lassen.

Die folgenden Daten für eine Maschine, deren Leistung bei 1250 Umdrehungen in der Minute 65 V und 60 Am betrug,

sind einer Abhandlung¹⁾ von W. Kohlrausch entnommen, auf welche als Muster einer eingehenden Dynamomaschinenuntersuchung hier verwiesen wird. Die Maschine war mit Compoundwicklung versehen; die Anzahl der Nebenschlusswindungen betrug 2000, der Widerstand derselben 21 Ohm, die Anzahl der direkten Windungen war 25, ihr Widerstand 0,02 Ohm. Der Ankerkern war 300 mm lang und hatte einen Durchmesser von 170 mm; er setzte sich aus 830 scheibenförmigen Blechen zusammen, deren jedes eine Dicke von 0,75 mm hatte. Auf dem Anker befanden sich 76 Windungen, von denen je zwei zu einer Spule vereinigt waren; der Widerstand der Ankerwindungen betrug 0,112 Ohm. Das Gesamtgewicht der Maschine war etwa 600 kg und der Kraftverbrauch bei voller Belastung 4,2 P.S. Die Maschine arbeitete bei etwa 37% von derjenigen Kraftliniendichte, welche der magnetischen Sättigung des angewandten Gusseisens entspricht. Die Compoundirung der Maschine war eine vorzügliche; die Schwankungen in der Klemmenspannung betragen nur 2 auf 65 Volt, wenn die Belastung von Null bis zum Maximum stieg.

Die Maschinen dieses Typus finden vielfach als Motoren Verwendung. Die Umdrehungszahl ist bei konstanter Klemmenspannung in Folge der guten Wirkung der Compoundwicklung bei jeder Belastung überaus gleichmässig. Auf der Gewerbe- und Industrie-Ausstellung zu Bremen im Jahre 1890 wurden durch Dynamomaschinen dieses Systems 15 P.S. auf 250 m Entfernung übertragen; der Generator versorgte gleichzeitig die Erzeugungs- und Empfangsstation der Kraftübertragung mit elektrischem Licht.

In jüngster Zeit sind die Deutschen Elektrizitäts-Werke mit Maschinen von etwas veränderter Gestalt hervorgetreten, die ausschliesslich als Generatoren Anwendung finden. Fig. 137 zeigt das Aeussere einer solchen. Die veränderte Gestalt der die Magnetschenkel verbindenden oberen Platte fällt sofort ins Auge; im Innern bietet die Konstruktion der Maschine nichts wesentlich neues. Das grösste Modell dieser Maschine ist für eine Leistung von 110 V und 500 Am bei 500 Umdrehungen in der Minute bestimmt. Bei voller Belastung bedarf sie einer Triebkraft von 80 P.S., ihr Gesamtgewicht beträgt 5000 kg.

¹⁾ W. Kohlrausch, Beobachtungen zur Theorie der Dynamomaschinen. Die Lahmeyer-Maschine. Centralbl. f. Elektrotechnik 1887.

Kapitel XI.

Historische Bemerkungen. — Die Entdeckung von Fontaine. — Der Bericht von Figuier. — Das Pinkus'sche Patent. — Die ersten Elektromotoren. — Die von Page angelegte elektrische Bahn. — Ein mittelst Elektrizität betriebener Pflug. — Elektrische Aufzüge, Ventilations- und Pumpanlagen. — Die verschiedenen Systeme der neueren elektrischen Strassenbahnen. — Vergleich zwischen Batterie- und Leitersystem. — Die elektrischen Bahnen der Firma Siemens & Halske und der Thomson-Houston-Company. — Die elektrischen Strassenbahnen bei Breesbrook-Newry und Blackpool. — Die Telfer-Linie bei Glynde. — Der elektrische Strassenbahnwagen von Reckenzaun. — Vergleich zwischen Betrieb mittelst Pferden und mittelst Elektrizität.

Die Entdeckung des Principes, dass mechanische Energie durch Anwendung zweier Dynamomaschinen und einer sie verbindenden Leitung auf grosse Entfernungen übertragen werden kann, wird allgemein Hypolite Fontaine zugeschrieben, der neuerdings in einer Abhandlung¹⁾ eine eingehende Beschreibung davon gab, wie er diese Entdeckung machte. Da der Gegenstand jetzt von historischem Interesse ist, wollen wir hier kurz darauf eingehen.

Hypolite Fontaine berichtet:

„Am 1. Mai 1873 wurde die Internationale Ausstellung zu Wien officiell eröffnet, während die Maschinenhalle, die noch nicht vollendet war, bis zum 3. Juni geschlossen blieb. Ich war mit der Anordnung einer Reihe von Ausstellungsgegenständen betraut, die damals zum ersten Male öffentlich gezeigt wurden. Unter diesen befand sich eine Grammesche galvanoplastische Maschine mit einer Leistung von 400 Am und 25 V; ferner eine magnetelektrische Maschine, die ich durch eine Primärbatterie oder durch eine Plantésche Akkumulatoren-

¹⁾ Transmission électrique von Hypolite Fontaine, Baudry et Cie, Paris.

batterie betreiben wollte, um zu zeigen, dass die Grammesche Maschine auch als Motor verwandt werden kann. Ferner hatte ich eine von mir konstruirte Dampfmaschine für Koks-Feuerung und eine andere kleine Maschine desselben Typus für Gasheizung; eine Centrifugalpumpe, die einen künstlichen Wasserfall speisen sollte, und noch viele andere Ausstellungsgegenstände. Die Pumpe hatte ich so angeordnet, dass sie entweder von der Grammeschen magnetelektrischen Maschine oder von einer Dampfmaschine angetrieben werden konnte. Am 1. Juni wurde mir mitgetheilt, dass am 3. Juni 10 Uhr Vormittags die feierliche Eröffnung der Maschinenhalle durch den Kaiser stattfinden werde. Es war noch nichts fertig; aber jeder, der schon einmal in ähnlicher Lage war, weiss, wie viel in einem Zeitraum von 48 Stunden vor Eröffnung einer Ausstellung geschaffen werden kann. In jeder Abtheilung waren Vorstandsglieder, umgeben von einem Heer Arbeiter, damit beschäftigt, Packkisten fortzuschaffen und die für die einzelnen Nationen bestimmten Räume auszuschnücken. Der Vorstand besichtigte alle Ausstellungsgegenstände, um diejenigen auszuwählen, auf welche die besondere Aufmerksamkeit des Kaisers gelenkt werden sollte.

Roullex Duggage, das französische Kommissionsmitglied, bat mich, meine sämmtlichen Maschinen in Bewegung zu setzen, und am 2. Juni war ich so weit, dass ich die Dampfmaschinen, die galvanoplastische Maschine und die Centrifugalpumpe in Betrieb setzen konnte. Es gelang jedoch nicht, weder mit Hülfe der Primär-, noch mit Hülfe der Secundärbatterie den Motor in Gang zu bringen. Dies war eine grosse Enttäuschung, weil mir besonders daran lag, die Grammesche Dynamomaschine als Motor vorzuführen. Es quälte mich den ganzen Abend und die folgende Nacht, und ich suchte fortwährend nach einem Mittel, mein Vorhaben auszuführen. Erst am Morgen des 3. Juni, wenige Stunden vor Eröffnung der Ausstellung, bekam ich den Einfall, die kleine Maschine durch eine Zweigleitung von der grossen zu betreiben. Da mir kein Leitungsdraht zur Verfügung stand, wandte ich mich an den Vertreter von Manhes in Lyon, welcher mir in dieser Verlegenheit half. Als ich nun sah, dass die kleine magnetelektrische Maschine, nachdem ich sie mit der Dynamomaschine verbunden hatte, nicht nur in Bewegung gesetzt wurde, sondern so viel Kraft entwickelte, dass das von der Centrifugalpumpe gespeiste Reservoir überfloss, schaltete ich solange Leitungsdraht ein, bis die gelieferte Wassermenge ihren normalen

Betrag erreichte. Die gesammte Länge der Leitung betrug dann über 2 km, und hierdurch kam ich auf den Gedanken, dass man vermittelt zweier Grammeschen Dynamomaschinen mechanische Energie auf grosse Entfernungen übertragen könne“.

Eine andere Darstellung, welche Figuiet angiebt, lässt diese Entdeckung rein zufällig erscheinen. Er sagt, dass die Grammesche Gesellschaft auf der Wiener Ausstellung zwei Dynamomaschinen aufgestellt hatte, von denen die eine lief und die andere still stand. Ein Arbeiter sah zwei Kabelenden an der Erde liegen und im Glauben, sie gehörten zu der still stehenden Maschine, legte er sie an ihre Klemmen. Zum allgemeinen Erstaunen begann sich die Maschine von selbst in Bewegung zu setzen, und bald entdeckte man, dass sie durch den Strom der anderen betrieben wurde.

Welche von diesen beiden Darstellungsweisen nun auch die richtige sein mag, es geht daraus hervor, dass die elektrische Kraftübertragung frühestens 1873 bekannt war; aber es ist dennoch Grund vorhanden, anzunehmen, dass die Idee älter ist. W. Adams stellt in seinem Vortrage „Ueber die Entwicklung der elektrischen Eisenbahn“¹⁾, fest, dass im Jahre 1840 die Erfindung eines gewissen Henry Pinkus, welche eine elektrische Eisenbahn betraf, durch das Patentamt der Vereinigten Staaten geschützt wurde. Die Kraft sollte ein auf dem Wagen aufgestellter Elektromotor liefern, der durch den Strom einer gewaltigen Batterie angetrieben wurde. Da die letztere in den Erdboden eingesenkt werden sollte, so musste man den Strom auf eine gewisse Entfernung in den Wagen leiten, und Adams behauptet, dass das Princip der Uebertragung des Stromes in den bewegten Wagen zum Zwecke der Erhaltung seiner Bewegung das nämliche war, wie es noch heutzutage in Anwendung ist.

So sehen wir, dass die ersten Versuche auf dem Gebiete der elektrischen Kraftübertragung in Verbindung mit dem Problem der elektrischen Bahn gemacht wurden. Im Folgenden geben wir nach Adams eine kurze Uebersicht über die Entwicklungsstadien der Erfindung. Bezüglich näherer Einzelheiten verweisen wir auf die oben erwähnte Abhandlung. Der erste Elektromotor, welcher direkt eine drehende Bewegung hervorbrachte, wurde 1833 von Henry in Amerika erfunden. Dieser Motor war nur eine Spielerei, aber bald nachher verfertigten Davenport in Amerika, Jacobi in Russland,

¹⁾ Er sprach im Jahre 1884 vor der Society of Civil-Engineers, Amerika.
K a p p.

Davidson in Schottland und Little in England Motoren von beträchtlicher Grösse. Unter diesen ist der Jacobische am bekanntesten, welchen man 1839 zur Fortbewegung eines Bootes auf der Newa benutzte. Hier wurde die bewegende Kraft durch eine Primärbatterie geliefert; der Motor leistete etwa zwei Pferdestärken. 1845 erfand Page eine neue elektrische Maschine, die auf der „axialen Kraft des Elektromagnetismus“ beruhte, und einige Jahre später schlug er vor, diese Maschine zur Fortbewegung von Eisenbahnzügen zu benutzen. Dieser Gedanke fand öffentliche Unterstützung, und der Kongress stellte in der That Page die Summe von 120000 M. zur Verfügung, um seine Erfindung praktisch weiter auszubilden. 1851 wurde eine elektrische Lokomotive gebaut, welche einen aus mehreren Wagen bestehenden Zug von Washington nach Bladensburg — eine Entfernung von 8 km — führte. Man erhielt eine Geschwindigkeit von 30 km in der Stunde; aber da der Strom durch Batterien geliefert wurde, waren die Betriebskosten so hohe, dass ein kommerzieller Erfolg ausgeschlossen war. Erst, nachdem Siemens, Varley und Wheatestone gleichzeitig das dynamoelektrische Princip entdeckt hatten, wurde die Anlage elektrischer Eisenbahnen und anderer elektrischer Kraftübertragungen vom wirthschaftlichen Standpunkt aus möglich. Der Gedanke, auf einer Station Elektrizität durch Dynamomaschinen zu erzeugen und den Strom durch Leiter und Schleifkontakte in die fahrenden Wagen zu führen, wurde 1879 zuerst von Siemens praktisch ausgeführt; dieses System bildet bis heute die Grundlage für alle elektrischen Eisenbahnen, die direkt von der stromliefernden Dynamomaschine betrieben werden.

Nach diesem kurzen Ueberblicke über die Geschichte der elektrischen Eisenbahn ist es angebracht, kurz die ersten Anlagen für elektrische Kraftübertragung zwischen zwei Orten zu betrachten. Es wurde bereits erwähnt, dass die ersten Versuche auf diesem Gebiete im Jahre 1873 auf der Wiener Ausstellung angestellt wurden. Im Jahre 1879 wandten Chrétien und Felix diese Erfindung zum ersten Male auf der Zuckerfabrik zu Sermaize praktisch an. Die Herstellung des Rübenzuckers kann nur während eines kurzen Zeitraums im Jahre stattfinden, in der übrigen Zeit müssen die Maschinen still stehen. Man hielt es für vortheilhaft, die Dampfmaschinen der Zuckerfabrik während der Ruhezeit zum Pflügen der umliegenden Felder zu benutzen. Im Falle des Gelingens sollte dieses System auch auf andere landwirthschaftliche Arbeiten ausgedehnt werden.

Eine Grammesche Maschine wurde durch die Dampfkraft der Fabrik in Bewegung gesetzt, und der erzeugte Strom durch isolirte Leitungen auf eine Entfernung von 800 m nach dem Felde geleitet, welches umgepflügt werden sollte. Die Einrichtung war ähnlich wie diejenige eines Dampfpfluges; nur wurden die Seiltrommeln in diesem Falle nicht durch Dampfmaschinen, sondern auf jeder Seite durch zwei Grammesche Dynamomaschinen gedreht und in passender Weise geführt. Der Pflug wurde durch ein Stahldrahtseil, das sich abwechselnd auf die Trommeln auf- oder von denselben abgewickelte, über den Acker hin- und hergezogen. So brauchte man nur den Strom auf die eine oder die andere Gruppe der Dynamomaschinen zu schalten, um den Pflug vor- oder rückwärts zu bewegen. Nachdem eine Anzahl Furchen auf diese Weise gepflügt waren, wurden beide Seiltrommeln um ein gleiches Stück weiterbewegt, bis das ganze Feld bearbeitet war. Die Bewegung der Seiltrommeln wurde durch die Motoren besorgt, die zu diesem Zwecke mit einer besonderen Vorrichtung versehen waren. Die Geschwindigkeit des Pfluges betrug 16 m in der Minute, und es wurde in dieser Zeit eine Fläche von etwa 18 qm umgepflügt, eine Leistung, welche etwa der eines 5—6 pferdigen Fowlerschen Dampfpfluges entspricht.

In derselben Fabrik errichtete Felix im Jahre 1878 ein elektrisches Hebewerk, um die Zuckerrüben aus den Schiffen zu befördern und ersparte auf diese Weise 40% an Arbeit. Ein ähnliches, aber grösseres Hebewerk wurde neuerdings zu Soissons errichtet; es kann in zwanzig Stunden 500 t Zuckerrüben befördern.

Das von Felix gegebene Beispiel ist in Frankreich vielfach befolgt worden; es sind dort jetzt eine grosse Anzahl elektrischer Krahn und Aufzüge ausgeführt. Wir wollen nur einige der bedeutendsten Anlagen erwähnen. Die Kanonengiesserei zu Bourges wurde im Jahre 1882 mit einem elektrischen Krahn von 20 t Tragfähigkeit ausgerüstet. Er wird durch einen 12 pferdigen Grammeschen Motor betrieben, der den nöthigen Strom von einer 300 m vom Krahn entfernten Grammeschen Dynamomaschine erhält; diese gebraucht zur Hebung der Maximallast 20 Pferdestärken. Ein zweiter Krahn von 40 t Tragfähigkeit ist kürzlich für dieselben Werke konstruirt worden. In der Giesserei von Joseph Farcot ist ein Krahn für 30 t, der ursprünglich von Hand betrieben wurde, für elektrischen Betrieb eingerichtet, wodurch man die Zeit, welche zur Hebung der Last gebraucht wird, auf ein Drittel bis ein Viertel

gegen früher verminderte, als zehn Arbeiter den Krahn drehen. Um Unglücksfälle zu vermeiden, ist ein automatischer Apparat angebracht, welcher den Strom unterbricht, wenn die Belastung 30 t überschreitet. Der Wirkungsgrad dieses Systems, d. h. das Verhältniss der bei Hebung der Last geleisteten Arbeit zu derjenigen, die zur Bewegung der Dynamomaschine nöthig ist, wurde von Fontaine zu 38% bestimmt.

Die elektrische Kraftübertragung wird ferner vielfach zur Ventilation von Bergwerken und Gebäuden benutzt. Elektromotoren eignen sich gut zum Betriebe von Ventilatoren. Denn da beide mit hoher Geschwindigkeit laufen, können sie direkt mit einander gekuppelt werden. Eins der ersten Beispiele dieser Art bildet die von Mathet ausgeführte Anlage in den Gruben von Blanzay. Hier wird ein Ventilator von 80 cm Durchmesser und 30 cm Tiefe, welcher auf dem Grunde des Schachtes fast 500 m unter der Erde aufgestellt ist, direkt von einem Grammeschen Motor betrieben, welcher seinen Strom von einer ähnlichen oben aufgestellten 10-pferdigen Maschine erhält. Die Kosten der Anlage betragen, wenn man von dem transportablen Motor und Ventilator absieht, 3200 M; und Mathet schätzt, dass dieselbe Leistung bei einer pneumatischen Uebertragung 11600 M. gekostet hätte, ganz abgesehen davon, dass wegen des schlechteren Wirkungsgrades ein grösserer transportabler Motor nöthig gewesen wäre.

Unter den später eingerichteten elektrischen Ventilationsanlagen mag diejenige des Hôtel de Ville in Paris erwähnt werden, wo 35 Ventilatoren, von denen ein jeder mit einem kleinen Elektromotor versehen ist, innerhalb des Gebäudes vertheilt sind. Der Strom wird durch zwei Grammesche Maschinen, jede mit einer Leistung von 50 Am und 110 V, geliefert. Je nach Bedarf benutzt man den einen oder beide Generatoren. Ihre Geschwindigkeit beträgt 1250 Umdrehungen in der Minute, und diejenige der Ventilatoren, deren Grösse verschieden ist, liegt zwischen 1450 und 1750. Die Stromvertheilung findet an einem Schaltbrett statt, sodass alle 35 Ventilatoren von hieraus überwacht werden können.

Eine ähnliche Anlage wurde kürzlich in der École centrale zu Paris errichtet. Da hier aber die Ventilatoren mit den Motoren durch Riemen verbunden sind, so werden die Wärter durch besondere Apparate benachrichtigt, wenn einer der Riemen abgleiten sollte. Dies geschieht in folgender Weise. In den Stromkreis

jedes Motors ist ein Elektromagnet eingeschaltet, dessen Anker drei Stellungen einnehmen kann: wenn die Stromstärke die richtige ist, liegt der Anker an den Magneten an; eine zu dieser Stellung rechtwinkelige Lage nimmt er ein, wenn eine Alarmglocke in den Stromkreis eingeschaltet ist; geht kein Strom durch die Wickelung des Elektromagneten, so nimmt der Anker die Mitte zwischen diesen beiden Stellungen ein. In der letzten Lage wird er durch einen Sperrhaken festgehalten. Eine Feder sucht den Anker von den Magneten zu entfernen, aber bei normaler Stromstärke ist der letztere kräftig genug, um den Anker anzuziehen. Sollte ein Riemen abgleiten, so würde der betreffende Motor durchgehen; hierdurch wird der Strom geschwächt und die Anziehungskraft des Magneten lässt soweit nach, dass die Feder den Kern abreißt. Auf diese Weise wird der Strom unterbrochen, die Alarmglocke ertönt und benachrichtigt den Wärter davon, dass ein Ventilator ausser Betrieb gesetzt ist.

Ayrton und Perry haben den Vorschlag gemacht, an verschiedenen Punkten in dem Tunnel der Metropolitan Railway elektrische Ventilatoren aufzustellen. Der Strom sollte in einiger Entfernung erzeugt werden, sodass die Unannehmlichkeiten einer stationären Dampfmaschine weniger lästig wären als bei ihrer jetzigen Aufstellung, wo der Rauch aus Station- und Ventilationsschächten längs der ganzen Linie entströmt. Die schlechte Luft wäre vermitteltst Röhren, die durch Wasserbehälter führten, von den Ventilatoren wegzuführen.

Unter den ersten Anwendungen der elektrischen Kraftübertragung sind auch die Pumpwerke zu erwähnen, die seit 1883 auf einer Grube zu Thallern in Oesterreich in Thätigkeit sind. Vor Einführung des elektrischen Betriebes war auf der Sohle des Schachtes eine 6-pferdige transportable Dampfmaschine aufgestellt. Diese setzte eine Centrifugalpumpe in Bewegung, welche in der Minute 300 l durch eine Rohrleitung von 780 m Länge auf eine Höhe von 60 m hob. Jetzt ist die Dampfmaschine durch einen Elektromotor ersetzt; eine an der Oberfläche aufgestellte Dynamomaschine liefert den nöthigen Strom von 15 Am bei 500 V Spannung. Dies entspricht einer elektrischen Energie von 10,2 P.S.; und unter der Annahme eines Wirkungsgrades von 80% für den Generator würde die gesammte aufgewandte Arbeit 12,8 P.S. betragen. Die der Hebung des Wassers entsprechende Arbeit ist 4 P.S., wenn man von

der Reibung in der Rohrleitung absieht. Mit Berücksichtigung derselben wird sie wahrscheinlich 6 P.S. betragen. Der Wirkungsgrad der Anlage ist desshalb, einschliesslich der beiden Dynamomaschinen und der Centrifugalpumpe, etwa 50%.

Ein Hauptanwendungsgebiet der elektrischen Kraftübertragung ist der Betrieb von Eisen- und Strassenbahnwagen. Er kann auf zwei Weisen vor sich gehen. Einmal kann man eine Batterie im Wagen aufstellen und so die Kraftquelle mit sich führen, oder man bedient sich einer festen Kraftquelle und führt den Strom vermittelt Leitungen und Schleifkontakten in die fahrenden Wagen.

Der Kürze wegen wollen wir im Folgenden das erstere das Batteriesystem und das letztere das Leitersystem nennen. Vergleichen wir die Vor- und Nachtheile dieser beiden Systeme, so hat das Leitersystem natürlich den Vorzug einer direkteren Uebertragung, da nur zwei Umsetzungen zwischen der Energie der primären Bewegungsmaschine und der zur Fortbewegung des Wagens nöthigen erforderlich sind. Beim Batteriesystem muss die Energie der primären Bewegungsmaschine zunächst in elektrische umgewandelt werden, dann in chemische, welche in der Batterie angesammelt wird, und schliesslich muss diese wieder rückwärts im Motor in mechanische Energie umgesetzt werden. Die Einfügung der Batterie zwischen Dynamomaschine und Motor muss nothwendig den Wirkungsgrad des ganzen Systems herunterdrücken, da Elemente niemals die gesammte von ihnen aufgenommene Energie wieder zurückgeben werden. Ein weiterer Nachtheil ist, dass man das Eigengewicht der Batterie noch besonders mitführen muss. Auf der anderen Seite kann der Spannungsverlust, welcher dem Widerstande der Leitung entspricht, sehr bedeutend werden, und in Folge dessen der Energieverlust hier grösser als beim Batteriesystem. Der mittlere Widerstand der bei der Portrush Railway angewandten Leitungen ist zum Beispiel 1 Ohm, und wenn fünf Wagen, die über die ganze Linie vertheilt sind, laufen, so ist dafür ein Strom von 200 Am bei 250 V Spannung nöthig; dementsprechend würde sich der Energieverlust auf 37 P. S. belaufen. Die für fünf Wagen wirklich erforderliche Energie beträgt nun 68 P. S., folglich ist der Wirkungsgrad der Anlage, wenn die Isolation der Leitung vollständig ist, $\frac{68}{68 + 37} = 65\%$. Addiren wir hierzu noch den von der mangelhaften Isolation herrührenden Verlust, welcher von den

Witterungsverhältnissen abhängig ist, so finden wir, dass in diesem Falle das Leitersystem wirthschaftlich kaum günstiger als das Batteriesystem ist. Die Portrush Railway bildet allerdings insofern einen Ausnahmefall, als hier der Leitungswiderstand ungewöhnlich hoch ist. Bei der Blackpool Electric Tramway beträgt der Leitungswiderstand nur 0,5 Ohm, und der Spannungsverlust würde bei gleichzeitigem Betriebe von sechs Wagen und unter der Annahme, dass jeder etwa 18 Am gebraucht, 30 auf 200 V betragen. Dies entspricht einem Energieverlust von 15% in der Leitung. Würde diese Bahn durch Akkumulatoren betrieben, so wäre der Verlust voraussichtlich um 15% grösser.

Wir müssen ausser dem Wirkungsgrade jedoch noch andere Umstände berücksichtigen, wenn wir zwischen den beiden Systemen entscheiden wollen. In einigen Fällen ist die Anwendung einer festen, längs der Bahn über der Erde geführten Leitung ausgeschlossen. Sie würde nicht nur den anderen Verkehr stören, sondern sie bildete auch in den belebten Strassen eine ständige Gefahr, da sie von hochgespannten Strömen durchflossen wird und wegen des auf ihr gleitenden Schleifkontakts nicht mit Isolation versehen werden darf. Holroyd Smith und Lineff haben diese Schwierigkeit dadurch umgangen, dass sie den Leiter unter die Erde verlegten. Beim Gebrauche von Akkumulatoren ist ferner jeder Wagen vollkommen unabhängig von den anderen, was bei einem verzweigten Netz von Bahngeleisen von grosser Wichtigkeit ist. Nach diesem kurzen Vergleich zwischen den beiden Systemen können wir sagen, dass dasjenige mit oberirdischen Leitungen für Bahnen, die über Land gehen, geeignet ist; hier kann ohne Schwierigkeit eine Luftleitung mit hoher Spannung angewandt werden. Das System, das sich der in den Boden verlegten Leitungen bedient, kann bei unterirdischen Bahnen benutzt werden; die Verwendung von Akkumulatoren ist für Bahnen in den belebten Strassen einer Stadt am Platze.

Je nach der Eigenthümlichkeit der Leitung kann man nun noch folgende Eintheilung für die elektrischen Eisenbahnen machen:

1. Die Schienen werden als Leiter benutzt; in der einen fliesst der Strom im entgegengesetzten Sinne, wie in der anderen. In diesem Falle müssen die Schienen vom Erdboden isolirt sein und durch besonders konstruirte Verbindungsstücke aneinander geschlossen werden. Ferner sind die Wagenräder von den Achsen zu isoliren. Ein Beispiel dieser Art ist die Siemens'sche Bahn bei Lichterfelde

und die kurze Bahn am Strand von Brighton, welche von Magnus Volk erbaut wurde.

2. Ein besonderer Leiter wird für die Hinleitung des Stromes benutzt und für die Rückleitung die beiden Schienen. Diese brauchen nicht von der Erde isolirt zu sein, müssen aber des guten Kontaktes wegen durch besondere Verbindungsstücke an einander angeschlossen werden. Die Leitung kann oberirdisch oder unterirdisch geführt sein. Beispiele dieser Art sind die Eisenbahnen in Bremen, Portrush, Newry und Blackpool.

3. Für Hin- und Rückleitung werden besondere Leiter verwandt. Diese werden über der Erde an Stangen geführt und bestehen bei oberirdischen Bahnen aus aufgeschlitzten Kupferrohren oder bei unterirdischen Bahnen aus Winkeleisen. Beispiele dieser Art sind die Bahnen in Mödling, Lichterfelde, Frankfurt, Budapest, auf der Grube zu Zaukerode und andere.

4. Für Hin- und Rückleitung werden besondere Leiter benutzt. Diese sind an Trägern befestigt und so angeordnet, dass sie eine einzige Linie bilden, längs der an Rollen aufgehängte Wagen laufen. Ein Beispiel dieser Art ist die Telfher-Bahn zu Glynde.

Die folgende Tabelle giebt eine Uebersicht der elektrischen Eisenbahnen, welche von der Firma Siemens & Halske nach ihrer Angabe gebaut wurden. Es ist darin auch die Bahn von Portrush mit aufgenommen, welche von Siemens Brothers in London angelegt wurde.

Bei der elektrischen Bahn, welche die Station der Anhaltischen Eisenbahnlinie mit dem Vorort Lichterfelde verbindet, wurde die Zu- und Rückleitung des Stromes durch die beiden von einander isolirten Schienen ausgeführt. Dies System war ursprünglich für eine elektrische Hochbahn bestimmt, welche auf Säulen hinführend verkehrsreiche Strassen entlasten sollte. Weil sich hierfür aber zur Zeit keine passende Gelegenheit bot, wurde die Bahn auf ebener Erde angelegt, um den ersten Versuch nicht länger hinauszuschieben. Den Verlusten, welche die mangelhafte Isolation der Schienen vom Erdboden, besonders bei feuchtem Wetter, verursachen, stehen die geringen Anlagekosten gegenüber und die Möglichkeit, jede beliebige, schon vorhandene Bahnlinie in eine solche mit elektrischem Betrieb umzuwandeln. So wurde auch die erste elektrische Bahn auf einem Bahnkörper angelegt, welcher vorher für den Verkehr einer normalspurigen Dampfbahn gedient hatte. Die Schienen wurden ohne weitere

Elektrische Eisenbahnen,
welche von der Firma Siemens & Halske gebaut wurden.

Ort	Länge	Zahl der Maschinen und Motoren	Betriebskosten	Art der Stromzuführung	Grösste Steigung	Kleinster Krümmungsradius in Meter
Lichterfelde bei Berlin 1881 und 1890	4 km eingeleisig	3 elektr. Wagen	24 Pf. pro Wagenkilometer.	Auf 2,4 km Schienenleitung u. auf 1,6 km oberirdisch	1 : 100	30
Frankfurt-Offenbach 1884	6,7 km eingeleisig	10 elektr. Wagen, 4 Beiwagen	19,5 Pf. pro Wagenkilometer.	Oberirdisch, geschlitzte Röhren	1 : 30	30
Grubenbahn in Zauckerode 1883	0,7 km eingeleisig	2 elektr. Lokomotiven von je 200 kg Zugkraft	9,18 Pf. pro Tonnenkilometer	Eisenleitung, am Stollenfirst befestigt	1 : 1000	—
Grubenbahn in Neu-Stassfurt 1883	1,1 km eingeleisig	3 elektr. Lokomotiven von je 250 kg Zugkraft	12,9 Pf. pro Tonnenkilometer	desgl.	1 : 1000	9
Hohenzollern-Grubenbahn 1883	1,8 km eingeleisig	3 elektr. Lokomotiven von je 250 kg Zugkraft	6,73 Pf. pro Tonnenkilometer	desgl.	1 : 1000	—
Mödling (bei Wien) 1883	4,5 km eingeleisig	8 elektr. Wagen, 7 Beiwagen	—	Oberirdisch, geschlitzte Röhren	1 : 66	30
Portrush 1883	9,6 km eingeleisig	7 Wagen	—	Oberirdisch L-Eisen, Rückleitung durch die Schienen	—	—
Budapest, Stadtbahn	9,1 km (15,58 km Geleislänge); projektirt sind 38,6 km Geleislänge	29 elektr. Wagen, 8 Beiwagen. Projektirt sind 50 elektr. Wagen, 20 Beiwagen	—	Unterirdische Stromzuführung	1 : 6215	25

Isolation auf Holzschwellen befestigt und der Stromleitung wegen an ihren Enden nur mit angenieteteten elastischen Metallstreifen versehen. Der Strom fliesst am Umfang der Räder zu dem Motor des Wagens, dessen übrige Metalltheile dadurch vollständig isolirt sind, dass der Radkranz auf einer Holzscheibe aufsitzt. Es wurden auch gleichzeitig Versuche mit oberirdischer Stromzuführung vorgesehen. Diese geschah durch einen Kontaktwagen, welcher auf einem oberirdisch auf Stangen befestigten Drahte lief. Im Jahre 1890 ist die Linie bis zum Bahnhofe der Potsdamer Eisenbahn verlängert.

Grossen Vortheil gewährt offenbar der elektrische Betrieb bei Grubenbahnen, wo der nothwendige Strom oberirdisch erzeugt und durch Kabel an die Gebrauchsstelle geleitet werden kann. Beispielsweise soll hier die Bahnanlage in dem Salzwerke zu Neu-Stassfurt kurz beschrieben werden. Die Bahnlinie befindet sich auf der 300 m tiefen Sohle des Agatheschachts. Eine über Tage arbeitende Dynamomaschine mit Compoundwicklung und trommelartigem Anker (350 V Klemmenspannung und 20 P. S. Triebkraft) liefert den Strom, welcher durch eine 410 m lange Leitung zu der Verbrauchsstelle geführt wird. Hier tritt er in Schienen aus \perp -Eisen, welche an dem Stollenfirst befestigt sind und durch Kontaktschlitten und kurze Kabel mit den Klemmen des Motors in leitender Verbindung stehen. Die Rotation des Ankers wird durch ein mit konischen Rädern versehenes Vorgelege auf die Triebräder der Lokomotive übertragen, deren Zugkraft bei einem Gewicht von 2200 kg rund 200 kg beträgt. Die Lokomotive befördert einen Zug von 16 belasteten Wagen (von je 1200 kg Gewicht) mit einer mittleren Geschwindigkeit von 3 m in der Sekunde. Die Regulirung des Stromes erfolgt durch Einschaltung von Widerständen.

Ein Beispiel für unterirdische Stromzuführung bildet die jüngst von der Firma Siemens & Halske ausgeführte Anlage der Strassenbahn in Budapest. Die Stromleitungen befinden sich hier in einem unterirdischen Kanal, welcher unter der einen Fahrschiene verläuft (Fig. 138). Er hat einen ovalen Querschnitt von 28 cm Breite und 33 cm Höhe und ist an seinem Scheitel aufgeschlitzt. Zu beiden Seiten des 33 mm breiten Schlitzes liegt je eine Hälfte einer gewöhnlichen Strassenbahnschiene. Diese ist in Abstände von 1,20 m auf eisernen Rahmen befestigt, welche gleichsam das Gerippe für den aus Beton ausgeführten Kanal bilden und gleichzeitig die Isolatoren für die Hin- und Rückleitung tragen. Letztere bestehen aus Winkeleisen, längs

denen Kontaktschiffchen durch den fahrenden Wagen fortgeführt werden. Die Leitungen werden durch die darüber liegende Schiene geschützt und liegen so hoch über der Sohle des Kanals, dass das durch den Schlitz dringende Tageswasser unter ihnen in die Strassenkanäle abfließen kann. Unter der anderen Fahrschiene befindet sich kein Kanal. Sie kann deshalb jede passende Form erhalten. Im vorliegenden Fall ist auch die zweitheilige Strassenbahnschiene von Haarmann gewählt worden. Unter dem Wagen, dessen Form von der sonst für Strassenbahnen üblichen nicht sehr abweicht, befindet sich zwischen den Achsen der Elektromotor. Die Umdrehung seines Ankers wird durch ein Vorgelege auf die Wagenachse übertragen. Vier Gruppen von Widerständen ermöglichen die Regulierung des

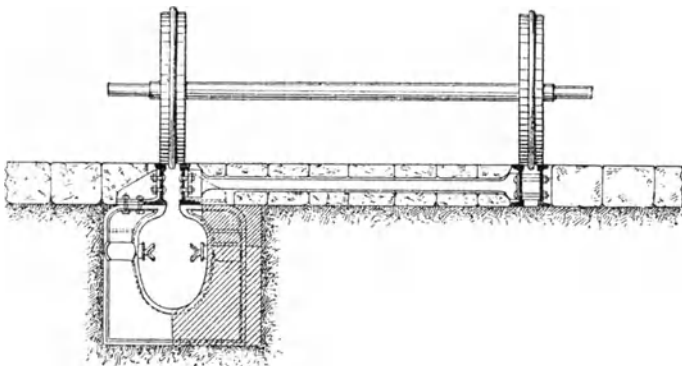


Fig. 138.

Stromes, welcher in einer Centralstation mit 300 V Spannung erzeugt und durch Patentbleikabel nach drei Vertheilungskasten und von hier aus nach den Leitungen aus Winkeleisen geführt wird. Drei Dynamomaschinen erzeugen den nothwendigen Strom. Zu ihrem Antrieb sind 4 Dampfmaschinen zu je 100 P.S. aufgestellt. Die Anlage hat sich so gut bewährt, dass ihre Erweiterung in naher Zeit bevor steht.

Im vorigen Jahre hat das von der Thomson-Houston-Company vertretene Strassenbahnsystem durch eine Anlage in Bremen auch in Deutschland Eingang gefunden. Vorher hat diese Firma schon sehr viele Strassenbahnen in Amerika ausgeführt. Es waren am 1. April 1890 61 Strassenbahnen mit 665 Motorwagen und 746 km Geleislänge im Betrieb; am 1. Juni 1890 betrug die Zahl der im Betrieb

und im Bau begriffenen Linien 116. Die Stromzuleitung findet hier durch eine oberirdische Leitung statt, welche auf Trägern über der Mitte der Schienen angebracht ist; die Rückleitung erfolgt mittelst der Schienen durch die Erde. Die Bremer Linie hat eine Länge von 1,6 km und ist fast durchweg doppelgeleisig. Sie ist mit 6 Motorwagen ausgerüstet, von denen jeder zwei Motoren von je 10 P.S. besitzt. Die Maschinenstation enthält zwei Dynamomaschinen mit Compoundwicklung, von denen jede 62500 Watt bei 500 V Spannung leisten kann.

Die elektrische Eisenbahn zwischen Bessbrook and Newry wurde im September 1885 dem Verkehr übergeben. Die 4,5 km lange Linie vermittelt den Verkehr zwischen diesen beiden Städten, welcher sich jährlich auf etwa 28000 t beläuft. Die den Strom liefernden Dynamomaschinen sind etwa in der Mitte der Linie aufgestellt, wo bedeutende Wasserkräfte zur Verfügung stehen. Eine 65 pferdige Turbine treibt hier zwei Edison-Hopkinsonsche Dynamomaschinen an, von denen eine allein den ganzen Verkehr bewältigen kann, während die andere als Reserve dient. Die Anlage arbeitet mit einer Spannung von 250 V, und der Strom wird in einem eisernen röhrenförmigen Leiter fortgeleitet, der in gleicher Höhe mit den Schienen liegt und von Holzblöcken getragen wird; diese sind wieder in der Mitte des Geleises auf den Bahnschwellen befestigt. Im Vordertheile jeder der beiden Personenwagen, die zur Zeit im Betrieb sind, ist eine Edison-Hopkinsonsche Dynamomaschine aufgestellt, welche als Motor wirkt. Ein Kontaktschiffchen schleift am Vorder- und Hintertheil des Wagens auf der mittleren Schiene und stellt so einen ununterbrochenen Kontakt auch bei Kreuzungen von Landwegen und bei Weichen her, wo die Stromzuleitung durch ein unterirdisches Kabel vermittelt wird. An einer Stelle wird die Bahn jedoch von einer grossen Landstrasse geschnitten, und hier würden auf dem Erdboden hinführende Leitungen hinderlich sein. An Stelle derselben treten deshalb auf eine Entfernung von 50 m zwei Luftleitungen, die in einer Höhe von 4,50 m über dem Erdboden an Pfählen befestigt sind; ein auf dem Dache des Wagens angebrachter Schleifkontakt dient zur Stromzuführung, wenn sich der Motor an dieser Stelle der Bahn befindet. Der Personenwagen, welcher gleichzeitig als Lokomotive dient, wiegt 8 t und erreicht auf ebener Bahn eine Geschwindigkeit von 24 km in der Stunde. Er bietet für 34 Passagiere Platz und kann gleichzeitig einen Zug beladener Wagen bei einer Steigung von 1 auf 85 mit einer Geschwin-

digkeit von 11 km in der Stunde ziehen. Das Gesamtgewicht des Zuges, einschliesslich der Lokomotive und der Passagiere, beträgt 26 t, und der Motor leistet etwa 25 P. S. Die stärkste Steigung ist 1 zu 50, und die schärfste Kurve hat 45 m Radius. An den beiden Enden hat die Bahnlinie eine birnenförmige Gestalt, und der kleinste Krümmungsradius beträgt hier 17 m. Diese Einrichtung macht ein Umdrehen der Wagen nach jeder Fahrt auf der Drehscheibe unnöthig. Die Wagen sind 10,5 m lang und laufen auf Doppelschienen von 0,9 m Spurweite; die Räder sind mit dem gewöhnlichen Radkranz versehen. Die Güterwagen haben Räder ohne Kranz, eine Spurweite von 1 m und laufen auf flachen Schienen, die ausserhalb der zuerst genannten Schienen und um 2 cm tiefer liegen. Die Schienen für die Personenwagen bilden so eine Führung für die Räder der Güterwagen, und letztere können wegen ihrer breiten Räder ohne Kranz an jedem Ende der Bahn vom Geleise fortgezogen und auf den gewöhnlichen Landstrassen weitergeschafft werden. In den ersten vier Monaten nach der Eröffnung der Bahn wurden im Ganzen 25 000 Personen und 1600 t Güter befördert, und die gesammte von den Wagen durchlaufene Weglänge war 8300 km.

Bei der elektrischen Eisenbahn von Blackpool, deren Länge 3 km beträgt, ist die Leitung unter die Erde verlegt. Sie besteht aus zwei halbkreisförmigen Kupferkanälen (Fig. 139), welche von gusseisernen Trägern, von denen sie jedoch isolirt sind, gehalten werden. Der Leiter ist in zwei Theile getheilt, damit jeglicher Schmutz oder andere Fremdkörper, welche durch den Schlitz im Strassenpflaster auf die Leitung fallen könnten, nicht darauf liegen bleiben, sondern durch den Raum zwischen den beiden Leitertheilen hindurchfallen. Die Stromzuführung besteht aus einem Stahlrahmen, welcher schmal genug ist, um in den Schlitz zu passen, und aus Kontakten, die längs des unterirdischen Leiters schleifen. Diese sind von dem Stahlrahmen isolirt und durch ein isolirtes Kabel mit einer federnden Klemme verbunden, die unter dem Wagen angebracht ist. Leichte Lederriemen dienen dazu, um den Rahmen den Schlitz entlang zu ziehen. Sollte die Bewegung des Leiters auf irgend eine Art gehindert werden, so reissen die Lederriemen ab. In Folge dessen wird das isolirte Kabel gespannt und aus der Klemme herausgerissen. Der Strom ist also unterbrochen, der Wagen bleibt stehen, und das Hinderniss kann sodann entfernt werden. Von der Klemme an der Unter-

seite des Wagens wird der Strom durch einen variablen Widerstand und einen Kommutator zu dem Motor geleitet; darauf kehrt er durch die Räder zu den Schienen und längs der letzteren zu der Dynamomaschine zurück. Zuerst wurden Nebenschlussmotoren angewandt, damit der Wagen nicht durchging, wenn er wenig belastet sich auf ebener Strecke befand oder mit starker Belastung eine geneigte Fläche hinunterlief. Es ist oben auseinandergesetzt, dass die Geschwindigkeit eines Nebenschlussmotors auch

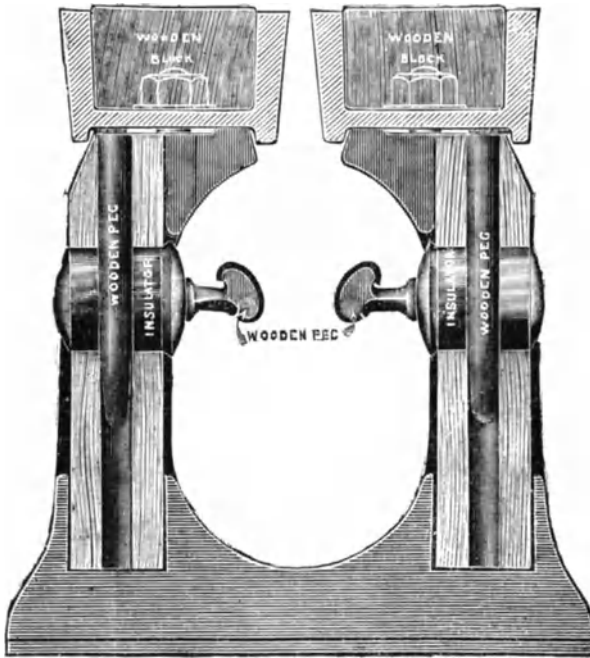


Fig. 139.

bei geringer Belastung eine bestimmte Grenze nicht überschreiten kann, während ein Hauptstrommotor unter gleichen Umständen eine gefährlich hohe Geschwindigkeit annimmt. Aus rein theoretischen Gründen sind daher Nebenschlussmotoren zum Strassenbahnbetrieb geeigneter. Aber man begegnete bald einer praktischen Schwierigkeit, welche von der Unsicherheit des elektrischen Kontaktes zwischen Rädern und Schienen herrührt. Wenn ein elektrischer Strom zwei Metalltheile, die mit einander in Kontakt

stehen, zu durchfliessen hat, so müssen vor allen Dingen die Oberflächen blank sein. Diese Bedingung kann von einer Strassenbahn, die dem Wetter ausgesetzt ist und vom anderen Verkehr gekreuzt wird, nicht erfüllt werden. So wird zuweilen der Strom auf kurze Zeit, vielleicht nur auf einen Bruchtheil einer Sekunde, unterbrochen; aber dieser Zeitraum genügt, um den Magnetismus der Feldmagnete zu schwächen. In Folge dessen ist der Anker bei erneutem Stromschluss nicht im Stande, die richtige elektromotorische Gegenkraft zu erzeugen, sodass ein starker Strom ihn durchfliesst, bevor die Magnete wieder voll erregt sind. Es muss dabei bemerkt werden, dass die hier geschilderte unangenehme Erscheinung sich um so fühlbarer macht, je geringer der Widerstand des Ankers ist. Je höher also der Wirkungsgrad des Motors ist, um so schädlicher wirken die zufälligen Unterbrechungen des Stromes. Da es völlig unmöglich war, diese Unterbrechungen zu vermeiden, wurden Nebenschlussmotoren nicht weiter verwandt, sondern Hauptstrommotoren eingeführt. In einem Hauptstrommotor wird die Feldintensität und damit auch die elektromotorische Gegenkraft sofort wieder hergestellt, sobald der Stromkreis geschlossen ist. Um ein Durchgehen bei schwacher Belastung zu verhindern, werden variable Widerstände, welche unter der Plattform an jedem Ende des Wagens angebracht sind, nach Bedarf eingeschaltet. Diese werden gleichfalls dazu benutzt, um die Geschwindigkeit des Motors zu reguliren, wenn er etwas mehr Arbeit leistet. Die Anwendung künstlicher Widerstände, in diesem Falle eine nothwendige Beigabe des Systems, hat natürlich immer einen Energieverlust zur Folge, und aus diesem Grunde ist die Methode von Reckenzaun, welcher die Kraft durch Kombination mehrerer Motoren regulirt, vorzuziehen. Die Motoren — für jeden der jetzt im Betrieb befindlichen sechs Wagen wird einer verwandt — haben nominell 6 P. S., können jedoch auf kurze Zeit bei einer Geschwindigkeit von 1000 Umdrehungen in der Minute 10 P. S. leisten. Jeder Motor wiegt 450 kg. Er wird mit einer mittleren Geschwindigkeit von 800 Umdrehungen in der Minute betrieben und erfordert einen mittleren Strom von 18 Am bei 200 V Spannung. Hiernach wären 5 elektrische Pferdekräfte, die wohl 4 gebremsten gleich zu setzen sind, nöthig, um einen mit 45 Personen besetzten Wagen auf ebener Strecke zu befördern. Die Bewegungsrichtung kann durch Umkehrung des Stroms im Anker verändert werden. Die Stromrichtung in der

Magnetwicklung bleibt dabei unverändert. Hierbei brauchen die Bürsten nicht verstellt zu werden, und die Gerade, welche ihre Auflegepunkte auf dem Kommutator verbindet, steht immer senkrecht auf der magnetischen Achse des Feldes. Die Bürsten bestehen aus kleinen massiven Kupferstücken, welche durch Federn sehr eng an den Kommutator gepresst werden. Es sind nur Stahlschrauben verwandt, die mit Gegenmuttern versehen sind, damit sie bei den Erschütterungen des Wagens nicht locker werden. Die Anker haben einen Durchmesser von 25 cm und sind mit einer Lage 1,6 mm dicken Drahts bewickelt, der mit reiner

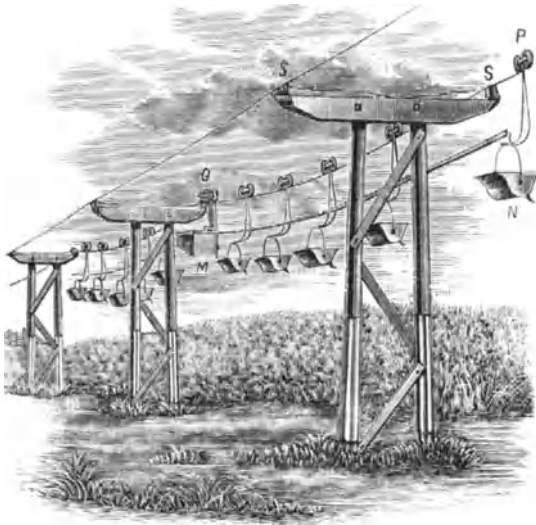


Fig. 140.

Seide umspinnen ist. Die beiden Generatoren sind in der Mitte der Bahn aufgestellt und gehören dem Seite 241 beschriebenen und durch Fig. 112 erläuterten Typus an. Jede dieser Maschinen wiegt 4 t und leistet bei einer Geschwindigkeit von 500 Umdrehungen in der Minute 180 Am bei 300 V Spannung. Da sich jedoch zeigte, dass für den jetzigen Verkehr eine Spannung von 200 V genügte, so wurde die Geschwindigkeit auf 350 Umdrehungen in der Minute heruntersetzt. Der Anker hat einen Durchmesser von 40 cm, und die Feldmagnete, die dem vierpoligen Typus angehören, werden durch kleine Dynamomaschinen besonders erregt, damit auf diese Weise

die Spannung je nach Bedarf in gewissen Grenzen selbstthätig geändert werden kann.

Die Telfher-Linie in Glyde hat etwa 1,5 km Länge. Sie wird selbstthätig ohne Hülfe von Wärtern oder Führern betrieben und bezweckt den Transport eines zusammenhängenden Zuges leichter Wagen, die an einem einzigen Schienenstrang, der zugleich die beiden Leiter bildet, aufgehängt sind und auf ihm fortrollen. Auf der beigefügten Abbildung (Fig. 140) ist M die Telfher-Lokomotive, deren Elektromotor durch Kettenübertragung mit den Rädern, die auf Gummi laufen, verbunden ist. Ausserdem ist diese noch mit zwei Regulatoren ausgerüstet, von denen der eine den Strom unterbricht, wenn die Geschwindigkeit eine bestimmte Grenze erreicht, und der zweite eine Bremse in Wirkung setzt, wenn der Zug noch schneller fahren sollte. Vor und hinter der Lokomotive laufen je fünf Wagen, von denen jeder 46 kg wiegt und 120 bis 150 kg Thon fasst; sie sind durch Stangen in richtiger Entfernung von einander gehalten. Die Gesamtlänge

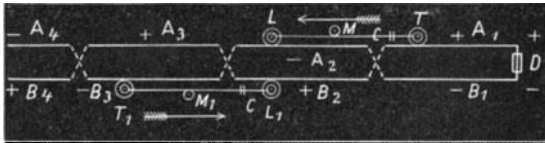


Fig. 141.

des Zuges, welcher im Ganzen aus 11 Wagen besteht, ist genau gleich der Entfernung zweier Träger; da nun die auf den Pfählen befestigten Schienen abwechselnd der Hin- und Rückleitung des Stromes angehören, so wird der erste und letzte Wagen jeder Zeit mit entgegengesetzten Polen verbunden sein. Der Strom wird an den beiden Enden des Zuges abgenommen und durch Drähte, welche auf der Abbildung nicht zu sehen sind, nach der Mitte geleitet, wo der Motor M arbeitet. Die Anordnung des Stromkreises ist schematisch in Fig. 141 gezeichnet, wo D die erzeugende Dynamomaschine ist und L T und $L_1 T_1$ zwei Züge bedeuten, die sich in entgegengesetzter Richtung auf der Strecke bewegen. Die Theile A_1, B_2, A_3, B_4 u. s. w. sind durch Querverbindungen aneinander angeschlossen und liegen am positiven Pole der Dynamomaschine; B_1, A_2, B_3, A_4 sind in ähnlicher Weise unter einander verbunden und liegen am negativen Pole der Dynamomaschine. Der Leiter besteht aus Stahlstäben von 2 cm Durchmesser und

20 m Länge, entsprechend der Entfernung zweier Pfähle; die Entfernung eines Leiters von dem auf dem gegenüberliegenden beträgt 1,6 m. Der Motor läuft mit 1600 bis 1700 Umdrehungen in der Minute; der Zug legt in der Stunde 6 bis 8 km zurück. Wenn immer ein Zug hin- und zurückläuft, so würden in der Woche 150 t Thon befördert werden; aber es können gleichzeitig 20 Züge auf der doppelten Linie fahren.

Um in diesem Falle einen Zusammenstoss auszuschliessen, hat Fleeming Jenkins in Verein mit Ayrton und Perry ein automatisches elektrisches Blocksystem erdnen, das in Fig. 142 schematisch dargestellt ist. An bestimmten Punkten der Bahn ist das regelmässige Ueberkreuz-System durch Einfügung leerer Theile, A_5 B_5 verändert, die nur, wenn die Ausschalter K K_1 geschlossen sind, vom Strom durchflossen werden können. Wenn der Schlüssel K_1 geöffnet ist, wird ein von A_5 anlangender Zug wegen Stromunterbrechung stehen bleiben, und ähnlich so, wenn K geöffnet ist, ein auf B_5 anlangender. Werden die Ausschalter geschlossen, so fährt der Zug wieder weiter. Diese

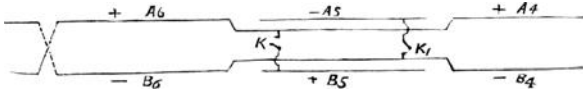


Fig. 142.

Ausschalter werden wie Relais-Kontakte durch schwache Signalströme eines besonderen Kreises in Wirksamkeit gesetzt. Der vorherfahrende Zug schliesst oder öffnet diesen Stromkreis selbstthätig. Das eine Signal öffnet den Ausschalter und blockirt die Strecke; das nächste Signal schliesst den Ausschalter, stellt so die Verbindung wieder her und giebt damit die Strecke frei.

Bald nach Erfindung der Akkumulatoren wurden Versuche angestellt, um sie zur Bewegung von Wagen zu benutzen. Dies misslang jedoch aus zwei Gründen. Einmal waren die ersten Typen der Akkumulatoren sehr schwer im Vergleich zu der Energie, welche sie liefern konnten. Die Last, für deren Beförderung bezahlt wurde, war unter diesen Umständen nur ein geringer Bruchtheil vom Gesamtgewicht des Wagens. Ferner waren die Akkumulatoren nicht zuverlässig, hatten nur einen geringen Wirkungsgrad und waren in vielen Beziehungen mechanisch unvollkommen. In zweiter Linie waren die Vorrichtungen, welche dazu dienten, die hohe Geschwindigkeit des Motors in die verhältnissmässig niedrige der Räder umzuwandeln, in ihrer Wirkung

unsicher und leicht Störungen unterworfen. Zuerst wurde Riemenübertragung benutzt, aber diese versagte auf den gewöhnlichen Strassen, wie es auch von Riemen, die bald feucht, bald trocken und immer im Schmutz zu arbeiten haben, nicht anders zu erwarten war. Magnus Volk hat den Riemenbetrieb für seine kleine elektrische Eisenbahn am Strand von Brighton angenommen und ist mit den erzielten Erfolgen sehr zufrieden. Er verwendet doppelte lederne Gliederriemen; ein jeder kann durch eine Rolle, die auf einem vom Führer des Wagens gehandhabten Hebel befestigt ist, gespannt werden. Zuerst wurden gewöhnliche Lederriemen erprobt; sie erwiesen sich jedoch sogar auf dieser ausnahmsweise sauberen Strecke als völlig unbrauchbar. Ueber die Frage, wie sich lederne Gliederriemen auf einer schmutzigen Strecke, wo gewöhnliche Riemen versagen, halten werden, liegen keine Erfahrungen vor. Sodann wurde eine Uebertragung durch Stirn- und Winkelräder versucht. Wenn die Entfernungen zwischen den Centren der einzelnen Räder und die relative Lage derselben gegeneinander immer dieselben blieben, so würde eine derartige Uebersetzung jedenfalls gute Dienste leisten. Aber bei den Strassenbahnen muss zwischen den Achsenlagern und dem Wagenkörper ein gewisser Spielraum sein, und ausserdem ist die Höhe des Wagenbodens über dem Mittelpunkt der Achse veränderlich. Der Unterschied beträgt ungefähr 3 cm, je nachdem der Wagen voll oder leer ist, und auf unseren gewöhnlichen Strassengeleisen werden die vertikalen Schwingungen des Wagens diesen Unterschied noch beträchtlich vergrössern. Die Schwierigkeit, eine Uebersetzung durch Zahnräder so zu konstruieren, dass sie sich diesen Veränderungen anpasst, beseitigten Sprague und Elibu Thomson. Sie wandten eine federnde Aufhängung für den Motor an, die jetzt auf amerikanischen Bahnen sehr gebräuchlich ist. Eine Uebertragung durch Ketten hat man auch versucht; aber der Erfolg war bislang nicht derartig, dass sie häufiger angewandt wurde.

Reckenzaun wendet zur Uebertragung der Bewegung des Motors auf die Wagenachse eine an der Achse des Motors angebrachte Schraube ohne Ende an, die in ein entsprechendes Zahnrad an der Wagenräder eingreift, wie aus den Fig. 143 und 144 zu ersehen ist. Er benutzt zwei Motoren, deren jeder mit einem vierräderigen Wagen verbunden ist, welche für sich allein eine elektrische Lokomotive bildet und vom Wagenkörper völlig unabhängig ist. Das Gewicht des letzteren wird so auf die acht Räder vertheilt, dass

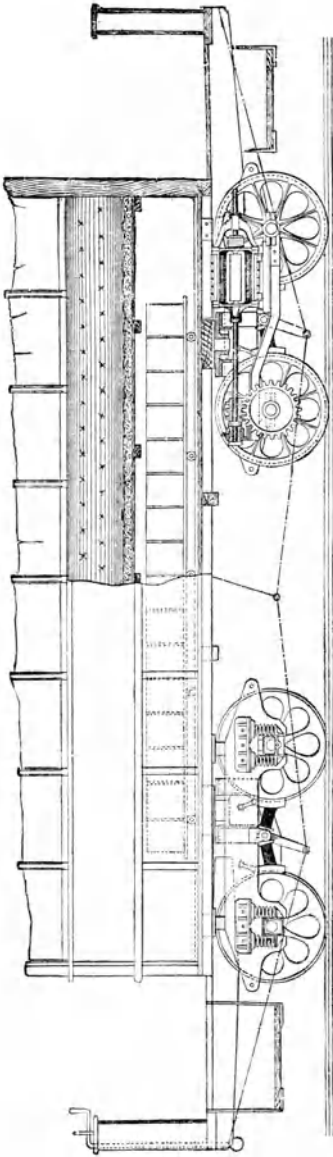


Fig. 143.

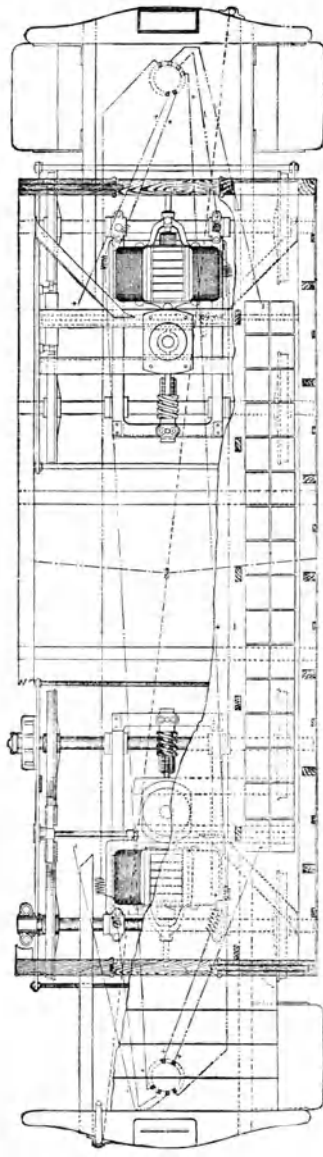


Fig. 144.

der elektrische Wagen trotz seines erhöhten Gewichtes auf den gewöhnlichen Strassengeleisen bewegt werden kann. Die Akkumulatoren sind unter den Sitzen in Trögen aufgestellt und können, wenn sie erschöpft sind, herausgezogen und durch frisch geladene ersetzt werden; das Verfahren dauert nicht länger als das Auswechseln von einem Paar Pferden. Die Tröge stehen nämlich auf Rollen und werden mittels der Winde, welche die frisch geladene Batterie in den Wagen hebt, zugleich heraus- oder hineingezogen. Zwei Motoren gelangten deshalb zur Anwendung, theils um die Betriebskraft auf die beiden Achsen zu vertheilen, ohne starke mechanische Verbindungen benutzen zu müssen, theils auch um die Geschwindigkeit des Wagens verändern zu können, ohne todte Widerstände in den elektrischen Stromkreis einführen zu müssen. Man sieht sofort, dass bei Hintereinanderschaltung der beiden Motoren die für jeden einzelnen verfügbare Spannung die Hälfte der Gesamtspannung sein wird. Wenn wir dagegen nur einen Motor benutzen oder beide Motoren parallel schalten, so ist für jeden die Gesamtspannung verfügbar und in Folge dessen die Geschwindigkeit etwa die doppelte der früheren. Ein Umschalter setzt den Führer des Wagens in den Stand, die verschiedenen Schaltungen der Motoren durch einen einzigen Handgriff vorzunehmen. Durch einen weiteren Handgriff wird die Bewegungsrichtung umgekehrt. Der Wagen ist ausser mit der gewöhnlichen Handbremse noch mit einer kräftigen magnetischen Bremse versehen, die durch eine besondere Vorrichtung selbstthätig wirkt, wenn die Geschwindigkeit über eine bestimmte Grenze steigt.

Ein nach diesen Principien gebauter Strassenbahnwagen wurde vor vier Jahren für die Berliner Pferdeisenbahn-Gesellschaft geliefert und war der Gegenstand eines interessanten Vortrags von Zacharias¹⁾ im Elektrotechnischen Verein zu Berlin, auf welchen wir wegen näherer Einzelheiten verweisen. Jeder Motor wiegt 190 kg, beide zusammen, einschliesslich der Transmissionstheile, etwa 500 kg. Die Akkumulatoren mit Gefässen und Zubehör wiegen 1250 kg. Sie müssen alle 2 bis 4 Stunden ausgewechselt werden. Das Gesamtgewicht eines im Betrieb befindlichen Wagens setzt sich aus folgenden Theilen zusammen:

¹⁾ Zacharias, Elektrischer Betrieb von Fahrzeugen. Elektrotechnische Zeitschrift Bd. VII.

Wagen, einschliesslich Motoren, Transmission und Akkumulatoren	3,75 t
46 Passagiere, Führer und Schaffner . . .	2,25 t
	<hr/>
	zusammen 6,00 t.

Die zur Fortbewegung einer Tonne Gewicht auf ebener Strecke erforderliche Zugkraft beträgt 12 kg; bei einer Geschwindigkeit von 12 km in der Stunde muss also zur Fortbewegung des voll belasteten Wagens eine Arbeit von etwa 3 P.S. geleistet werden.

Zacharias macht nun folgende Kostenanschläge zum Vergleiche von Pferde- und Akkumulatorenbetrieb. Er nimmt an, dass jeder Wagen von 5 Uhr Vormittags bis 1 Uhr Nachts, also 20 Stunden, täglich fährt, und dass alle 4 Stunden ein Auswechseln der Pferde nöthig ist. Danach wären für jeden Wagen täglich fünf Paar Pferde erforderlich.

Eine Linie, auf welcher 60 Wagen laufen, müsste deshalb 600 Pferde stets im Dienst haben; rechnet man dazu noch 10% als Reserve, so sind im Ganzen 660 Pferde erforderlich.

Um den Betrieb derselben Linie elektrisch zu unterhalten, wäre eine Dampfkraft von 750 P.S. nöthig und eine elektrische Anlage von einem den oben gegebenen Zahlen entsprechenden Umfang. Hiernach sind:

Die Anlagekosten	
für Pferdebetrieb	
Anschaffungskosten für 660 Pferde,	
1 Pferd zu 864 M.	570240 M.
Geschirre, Decken u. s. w.	55000 -
	<hr/>
	zusammen 625240 M.
für elektrischen Betrieb	
Dampfmaschinen von 750 P.S. einschliesslich Reserve	150000 M.
Kessel	80000 -
8 Dynamomaschinen (2 Reserve)	56000 -
140 Batterien zu je 1800 M.	252000 -
Kabel und sonstige elektrische Einrichtungen	22000 -
Elektromotoren für die Wagen	120000 -
	<hr/>
	zusammen 680000 M.

Man sieht, die Anlagekosten für den elektrischen Betrieb sind etwas höher als für Pferdebetrieb. Bedenkt man noch, dass die zur Unterbringung einer Maschinenanlage von 750 P.S. erforderlichen Räumlichkeiten nicht so viel Platz einnehmen, als die für Stallungen von 660 Pferden, so kann der Vergleich zwischen den Anlagekosten beider Systeme doch noch zu Gunsten des elektrischen ausfallen. Die Betriebskosten sind jedenfalls für den Pferdebetrieb bedeutend höher. Zacharias giebt folgende Zahlen:

Die Betriebskosten

für Pferdebetrieb

Abnutzung für 1 Tag und 1 Pferd	0,4840 M.
Futter für 1 Tag und 1 Pferd	1,5720 -
Hufbeschlagn und Pflege für 1 Tag und 1 Pferd	0,1613 -
	<hr/>
zusammen	2,2173 M.
Also für 660 Pferde und 365 Tage	534140 M.
Geschirrerneuerungen und Reparaturen	14454 -
	<hr/>
zusammen	548594 M.

für elektrischen Betrieb

Jährliche Ausgaben für 6570000 Pferdestärkestunden	131400 M.
Abschreibung und Erneuerung der Akkumulatoren, 20%	50400 -
Abschreibung auf Elektromotoren, 20%	24000 -
Abschreibung auf Dampfmaschinen, Kessel und Dynamomaschinen 10%	28600 -
Reparaturen, Schmiere, Säure, Löhne und Gehälter	23600 -
	<hr/>
zusammen	258000 M.

Nach dieser Schätzung wären die jährlichen Betriebskosten für den elektrischen Betrieb von Strassenbahnen nur etwa halb so gross als für Pferdebetrieb.

Kapitel XII.

Die Entwicklung der elektrischen Kraftübertragung in der Schweiz. — Aufzählung der einzelnen Anlagen. — Die elektrische Kraftübertragung von Kriegstetten-Solothurn und die Ergebnisse ihrer Prüfung. — Die Anlage von Aichberg. — Der neueste Typus der Brownschen Dynamomaschine.

Gegenwärtig sind so viele Anlagen für elektrische Kraftübertragung im Betrieb, dass die Wahl schwer wird, wenn man einige von ihnen für eine genauere Beschreibung herausgreifen will. Eine solche ist aber für den praktischen Elektrotechniker von grösster Wichtigkeit und soll deshalb das Schlusskapitel bilden. Denn dies Buch ist in erster Linie nicht für Theoretiker bestimmt, sondern für Leute, welche in die Lage kommen können, eine elektrische Kraftübertragung selbst zu entwerfen und zu bauen oder eine schon bestehende zu prüfen. Für den vorliegenden Zweck sind die Anlagen der Maschinenfabrik Oerlikon in der Schweiz gewählt worden, weil sie durch unparteiische Sachverständige geprüft sind. Der Verfasser brauchte also in diesem Falle nicht lediglich die Angaben des Fabrikanten zu wiederholen, welche, wenn auch zuverlässig, oft doch nur mit Misstrauen aufgenommen werden.

Bevor wir auf die technischen Einzelheiten der Anlagen eingehen, wird es interessant sein, kurz die Gründe anzugeben, welche Brown, den elektrotechnischen Leiter der Maschinenfabrik Oerlikon, bestimmten, sich der Vervollkommnung der elektrischen Kraftübertragung zu widmen. Bis 1886 baute die Fabrik nur Dynamomaschinen zu Beleuchtungszwecken. Aber der hohe Wirkungsgrad, welcher sich mit diesen und anderen gut konstruirten Maschinen erzielen liess, und die Thatsache, dass sie sich ebenso gut zu Motoren eigneten, führten Brown zu dem Schlusse, dass ihre Verwendung zur Kraftübertragung eine Frage sei, die sich durch sorgfältige Konstruktion und gute Ausführung lösen liesse. Die Nothwendigkeit, Kraft auf

kürzere oder längere Entfernungen zu übertragen, war für die Schweiz dadurch hinreichend bewiesen, dass verschiedene Kraftübertragungen auf grössere Entfernungen seit vielen Jahren trotz ihrer augenscheinlichen Mängel in Anwendung waren und es noch heute sind. Die Entfernung, bis zu welcher sich Seilbetrieb benutzen lässt, ist verhältnissmässig klein, die Anlage theuer und der Wirkungsgrad gering, wenn viele Zwischenstationen nöthig sind. Ferner ist die Abnutzung der Seile bedeutend, sodass man nicht nur eine grosse Summe für Reparaturen vorsehen muss, sondern auch häufig Betriebsstörungen vorkommen, wenn ein altes Kabel ausgebeSSERT oder gegen ein neues ausgetauscht werden muss. Trotz aller dieser Unvollkommenheiten wurde das System in Ermanglung eines besseren beibehalten.

Hier war demnach ein ausgezeichnetes Feld für die Einführung der elektrischen Kraftübertragung vorhanden, wenn man einen überzeugenden und praktischen Beweis ihrer Leistungsfähigkeit liefern konnte. Dies geschah, und gegenwärtig werden die Drahtseile in der Schweiz und in den benachbarten Ländern, wo Wasserkräfte zur Verfügung stehen, langsam, aber sicher durch elektrische Leitungen ersetzt. Die erste von Brown ausgeführte Anlage war eine Uebertragung von 50 P.S. auf eine Entfernung von 8 km zwischen Kriegstetten und Solothurn, wobei er einen Wirkungsgrad von etwa 74% erzielte. Es war bei der grossen Entfernung selbstverständlich, dass kein anderes System der Kraftübertragung angewandt werden konnte; auch hätte man alsdann mit einem bedeutend geringeren Wirkungsgrad zufrieden sein müssen. Die Anlage war vom wissenschaftlichen Standpunkte von vorn herein ein vollständiger Erfolg; noch günstiger jedoch war es, dass der Besitzer vom ersten Tage an mit dem Betriebe völlig zufrieden war. Aber trotz dieses Ergebnisses zögerten die anderen Fabrikanten zu dem neuen System überzugehen. Sie zweifelten keineswegs an der Richtigkeit der Resultate, welche eine zur Prüfung der Anlage zusammenberufene Kommission gefunden hatte; hierfür sprachen die Namen der Männer, die der Kommission angehörten. Aber das Ganze wurde anfangs mehr als ein interessanter Versuch betrachtet, und man befürchtete, dass die elektrische Maschinenanlage leicht Schaden nehmen und einen dauernden Betrieb nicht aushalten würde. Die Wasserbauten und die Maschinenanlagen, welche ein solches Kraftübertragungssystem mit sich brachte, verursachten bedeutende Kosten, und jedermann scheute die grossen Verluste für den

Fall, dass die elektrische Anlage nicht lange in betriebsfähigem Zustande blieb. Deshalb hielten es diejenigen, welche die elektrische Kraftübertragung sofort gern angewandt hätten, für klug, mit der Annahme dieses Systems so lange zu warten, bis durch die Kriegstetten-Solothurner Anlage der Beweis geliefert wäre, dass der elektrische Theil gerade so zuverlässig sei als der übrige rein maschinelle. Dies wurde voll bestätigt, und im Lauf der Zeit fangen die Fabrikanten in der Schweiz und in anderen Ländern damit an, zu dem neuen System überzugehen. Selbst Ingenieure, welche speciell Drahtseilanlagen ausführen, sind sehr erfreut darüber, dass sie durch die zunehmende Verwendung von elektrischen Uebertragungen keine Arbeiten mehr auszuführen haben, die selbst bei Aufwand der grössten Sorgfalt häufig zu Klagen Veranlassung geben. Auch die Seilübertragung zu Schaffhausen, einst der Stolz der Schweizer Ingenieure, ist durch das elektrische System überholt worden. Ein wenig unterhalb des alten Turbinenhauses, von wo jetzt 760 P.S. quer über den Strom durch Drahtseile übertragen werden, wird ein neues errichtet, in dem 300 pferdige Turbinen entsprechende Dynamomaschinen antreiben werden. Eine grosse Spinnerei hat sich bereits verpflichtet, 520 P.S. zu übernehmen, um damit 4 Motoren, zwei von je 60 und zwei von je 200 P.S. zu speisen. Nicht nur in der Schweiz, sondern auch in anderen Ländern ist eine stetige Zunahme der elektrischen Kraftübertragung zu vermerken, wie aus dem folgenden Verzeichniss der von der Maschinenfabrik Oerlikon bereits ausgeführten oder noch im Bau begriffenen Anlagen zu ersehen ist. In demselben sind Anlagen unter 50 P.S. und solche, die zum Betriebe von elektrischen Eisenbahnen dienen, fortgelassen.

Tabelle siehe nebenstehend.

Die letzten der angeführten Anlagen sind ein interessantes Beispiel für die Verwendung elektrischer Kraftübertragung für Tunnelbauten. Sie wurden für die Argentinisch-Chilenische Eisenbahn ausgeführt und sollen zum Betriebe der Luftkompressoren dienen, welche die Druckluft für die beim Tunnelbau verwandten Gesteinsbohrer liefern. Da die Maschinen in diesem Falle durch Maulesel an ihren Bestimmungsort gebracht werden sollen, so mussten sie so konstruirt sein, dass kein Theil der grösseren Maschinen mehr als 500 kg und kein Theil der kleineren mehr als 150 kg wog. Die

Ort	Anzahl der Dynamo- maschinen	Leistung der Dynamo- maschinen in Kilowatt	Über- tragene Leistung in P.S.	Entfernung in m
Solothurn	4	20	50	8000
Luzern	2	80 68	120	3000
Derendingen . . .	4	94	280	1300
Diesbach	2	80	120	600
Lugano	2	39 30	60	8000
Wald	3	84 20 65	125	725
Piovene (Italien) .	2	167	250	450
Pordeone (Italien) .	2	40	60	100
Schio (Italien) . .	2 2	98 72	300	6000
Gazzaniga (Italien) .	2 2	67 50 81 58	100 120	800 800
Cuorgne (Italien) .	2	63 59	96	325
Aichberg	2	67	100	600
Innsbruck	2	33	50	450
Kennelbach	2 2	65 49	200	2500
Poldolnitchaia (Russland)	2 2	23 17	70	300
Schaffhausen	2 1 2	200 310 50	600	600
Argentinische Repu- blik und Chile	10 10 8 8	54 49 27 24	1120	3000 und 7000

amomaschinen sind 6polige Trommelmaschinen, die Magnetschenkel einzeln abzunehmen und werden auf einem Stahlrahmen be-
gt, welcher gleichfalls in Stücke zerlegt werden kann.

Der Maschinentypus, den Brown in seinen ersten Anlagen und

auch jetzt noch in allen Fällen, wo kleinere Kräfte zu übertragen sind, verwendet, ist in Fig. 145 abgebildet. Die Anlage zwischen Kriegstetten und Solothurn besteht aus zwei Generatoren und zwei Motoren, welche nach dem Dreileitersystem hintereinandergeschaltet sind. Die Gründe für diese Anordnung waren folgende: 1. Indem man die Arbeit auf je ein Paar Maschinen vertheilte, wurde die Gefahr der Unterbrechung des gesammten Betriebes durch einen Fehler an einer der Maschinen ausgeschlossen. 2. Da die Maschinen für eine bedeutende Leistung konstruirt waren, konnte die Anlage, wenn auch theilweise ausser Betrieb, bedeutend mehr als die Hälfte der Kraft leisten. 3. Die grosse Entfernung machte die Anwendung hoher Spannung wünschenswerth; sie betrug im vorliegenden Falle

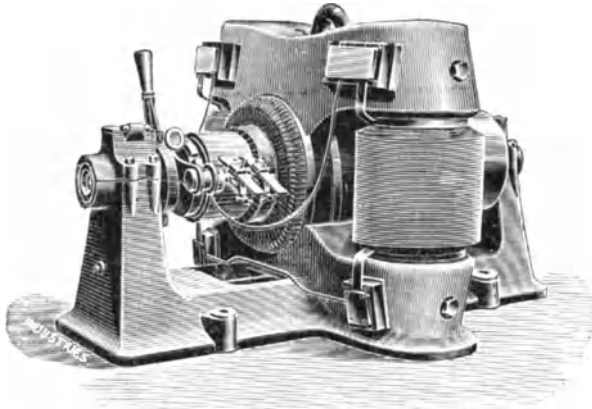


Fig. 145.

2000 bis 2500 V. Aber da die Erzeugung so hoher Spannung in einer einzigen Maschine als ein etwas gefährliches Unternehmen angesehen wurde, hielt es Brown für gerathen, Maschinen für die Hälfte der obigen Spannung zu bauen und diese hintereinanderschalten. 4. Für den Fall, dass nur die Hälfte der Maschinen im Betrieb war, konnte der mittlere Leiter mit dem unbelasteten äusseren Leiter parallel geschaltet und so der Widerstand der Linie verringert werden. Die zu übertragende Kraft schwankte je nach der Höhe des Wasserstandes zwischen 30 und 40 P.S., und die Geschwindigkeit der beiden Motoren war auf 700 Umdrehungen in der Minute festgesetzt. Die Uebertragung der Kraft von den Turbinen nach den Generatoren und von den Motoren nach der Fabriktrans-

mission geht durch Riemen vor sich. Die Maschinen haben Hauptstromwicklung und sind so konstruirt, dass ihre Charakteristiken einander vollständig entsprechen, um ein vollkommen selbstregulirendes System zu erhalten. Die Leitung besteht aus drei in der Luft geführten Kupferdrähten von 6 mm Durchmesser, welche an Oelisolatoren von Johnson and Phillips befestigt sind. Die mittlere Entfernung zweier Träger beträgt 36 m; nur an einer Stelle, wo die Leitung die Aar kreuzt, ist die Spannweite auf 120 m ausgedehnt. Hier wird Siliciumbronce statt Kupfer benutzt. Die Isolation der Leitung ist praktisch vollkommen, wie aus den unten mitgetheilten Versuchsergebnissen zu ersehen ist.

Die ersten Versuche wurden in der Fabrik selbst im November 1886 angestellt, wobei die Maschinen durch einen künstlichen Widerstand verbunden waren. Um die mechanische Kraft zu messen, welche einmal jedem Generator zugeführt und alsdann von jedem Motor abgegeben wurde, waren die ganzen Maschinen um die Mitte ihrer Achse in Schneiden drehbar aufgehängt. Bei dieser Anordnung müssen die Maschinen in Folge der Zugkraft, die der Anker auf das magnetische Feld ausübt, eine geneigte Stellung einnehmen, und die Abweichung von der Vertikalen wird um so grösser sein, je grösser die Zugkraft ist, welche auf den Anker wirkt oder von ihm ausgeübt wird. Die Beziehung zwischen dem Winkel und der entsprechenden Zugkraft kann durch direkte Messung an der stillstehenden Maschine bestimmt werden; ist die Maschine im Betriebe, so bildet das Produkt aus Zugkraft (gemessen durch den Ablenkungswinkel) und Geschwindigkeit ein Mass für die geleistete oder aufgenommene Arbeit. Gewisse Korrekturen sind natürlich sowohl bei dieser wie bei jeder anderen Messmethode zur Elimination der Fehler anzubringen; aber es gehört nicht in den Rahmen dieses Buches, hierauf näher einzugehen. Es genügt anzugeben, dass nach der Elimination dieser Fehler der wirtschaftliche Wirkungsgrad der gesammten Anlage, einschliesslich der künstlichen Leitung von 10 Ohm Widerstand, 70% und in einzelnen Fällen sogar 75% überstieg. Eine eingehende Beschreibung dieser Versuche findet man in der „Schweizerischen Bauzeitung“ vom Jahre 1887.

So ermuthigend diese Ergebnisse auch waren, man war doch noch nicht überzeugt, ob die Anlage, nachdem sie ausgeführt und einige Zeit im Betriebe war, eine gleich befriedigende Vollkommenheit zeigen würde. Wenn man eine Maschine in der Fabrik, wo

alles in der günstigsten Weise angeordnet werden kann, untersucht, so ist dies nicht dasselbe, als wenn man an derselben Maschine, nachdem sie einige Zeit dem täglichen Betriebe ausgesetzt war, Versuche anstellt; im letzteren Falle wird sie unzweifelhaft unter ungünstigeren Bedingungen arbeiten. Um in dieser Hinsicht auch nicht den geringsten Zweifel aufkommen zu lassen, wurde von der Maschinenfabrik Oerlikon eine zweite Kommission von Sachverständigen zusammengerufen, um die Kraftübertragungsanlage, nachdem sie fast ein Jahr im Betrieb gewesen war, an Ort und Stelle zu untersuchen. Ein ausführlicher Bericht über diese neuen Versuche befindet sich in der ersten und zweiten Nummer des Jahrgangs 1888 der oben erwähnten Zeitschrift. Die Methode der Arbeitsmessung vermittelt der Aufhängung in Schneiden, welche früher angewandt war, konnte hier natürlich nicht befolgt werden, da sie sich nicht mit dem Betriebe der Fabrik vereinigen liess. Man war deshalb genöthigt, eine andere Messmethode zu wählen. Die von den Motoren geleistete Arbeit wurde vermittelt eines Bremszaums gemessen und die den Generatoren durch die Turbine zugeführte auf folgende Weise bestimmt: Einer der Generatoren wurde entfernt und an seiner Stelle ein Bremszaum angebracht. Die Turbine wurde dann in Bewegung gesetzt, und die vom Bremszaum aufgenommene Arbeit für verschiedene Höhen des Wasserstandes, für verschiedene Geschwindigkeiten und verschiedene zugeführte Wassermengen gemessen. Auf diese Weise entstand eine Tabelle, aus welcher die Kraft zu ersehen war, die unter den verschiedensten Bedingungen von der Turbine dem Generator zugeführt werden konnte, wenn er wieder an seine Stelle gebracht war. Die elektrischen Messungen wurden mit speciell zu diesem Zwecke konstruirten Instrumenten ausgeführt, da die Kommission gefunden hatte, dass unter Benutzung der üblichen Strom- und Spannungsmesser bei der Bestimmung des Wirkungsgrades Fehler bis zu 5% unterlaufen konnten. Alle Messungen wurden möglichst gleichzeitig an beiden Enden der Linie vorgenommen, und alle Ablesungen, bei denen man im Zweifel sein konnte, ob sie in demselben Augenblick stattgefunden hatten, verworfen. Der Widerstand der Leitung wurde nach Ausschaltung des Ausgleichdrahtes bestimmt und schwankte je nach der Lufttemperatur von 9.04 bis 9.23 Ohm. Der mittlere Widerstand der vier hintereinandergeschalteten Maschinen betrug 14.31 Ohm, davon kamen auf die Generatoren 7.25 Ohm, auf die Motoren 7.06 Ohm. Die Kraft, welche man in Solothurn erhielt,

wurde von 17 bis 23 P.S. variirt. Bezüglich der Grösse der übertragenen Arbeit waren die Bedingungen bei den Versuchen nicht die günstigsten, da der Wirkungsgrad der Anlage bei voller Belastung wahrscheinlich grösser gewesen wäre, als bei weniger als halber Belastung. Weil jedoch der geringe Unterschied im Wirkungsgrad bei voller und geringer Belastung einer der Vorzüge der elektrischen Kraftübertragung vor den anderen Systemen ist, so müssen wir annehmen, dass diese bei geringer Belastung gefundenen Zahlen dem mittleren Wirkungsgrad entsprechen. Die Versuche wurden am 11. und 12. Oktober 1887 unter der Leitung von Weber, Veith, Amsler, Keller und Hagenbach angestellt; die folgende Tabelle giebt eine Uebersicht der gewonnenen Resultate.

1887	Arbeit in Pferdestärken		Wirtschaftlicher Wirkungsgrad			Bemerkungen
	den Generatoren zugeführt	v. den Motoren abgegeben	der Generatoren	der Motoren	der gesammten Anlage	
11. Okt. }	26.17	17.85	0.869	0.888	0.682	} Ein Generator u. ein Motor.
	24.56	16.74	0.871	0.868	0.682	
12. Okt. }	30.85	23.21	0.887	0.903	0.752	} Zwei Generatoren u. zwei Motoren.
	30.85	23.05	0.888	0.881	0.747	

Die Isolation der Leitung wurde durch gleichzeitige Messungen der Stromstärke an beiden Enden bestimmt. Man hätte natürlich auch den Isolationswiderstand mit der Brücke bestimmen können, aber der so gefundene Werth würde schwerlich sehr zuverlässig gewesen sein. Ein Stromkreis kann bei der mit der Brücke vorgenommenen Messung eine scheinbar vollständige Isolation ergeben, selbst wenn man 50 oder 100 Elemente benutzt; wird er jedoch einer Spannung von 2000 V ausgesetzt, so können sich doch erhebliche Fehler zeigen. Die Leitung wurde deshalb bei der Gebrauchsspannung untersucht, und die Ergebnisse waren die folgenden:

1887	Stromstärke an der		Bemerkungen
	Erzeugungstation	Empfangstation	
11. Okt. }	14.20	14.18	} Während starken Regens.
	13.24	13.29	
12. Okt. }	11.47	11.42	} Kein Regen.
	9.78	9.78	

Wenn die Isolation nicht vollkommen gewesen wäre, hätte die

Messung der Stromstärke an der Empfangsstation in beiden Fällen ein kleineres Resultat ergeben müssen als diejenige an der Erzeugungsstation. Aus der obigen Tabelle ergibt sich jedoch, dass die Unterschiede beider Messungen bald positiv, bald negativ sind und sich nur durch Beobachtungsfehler erklären lassen. Die Isolation muss daher in jeder Beziehung als vollkommen bezeichnet werden.

Eine grössere Anlage, jedoch mit nur einem Generator und einem Motor, ist neuerdings bei Aichberg in Tirol ausgeführt worden. Hier wird eine Wasserkraft von etwa 100 effektiven Pferdestärken, die sich in Schröff befindet, in der 1 km entfernten Papiermühle zu Steirermühle ausgenutzt. Beide Maschinen gehören dem in Fig. 145 dargestellten Typus an und liefern bei einer Spannung von 100 V einen Strom von 67 Am. Versuche, welche im Interesse des Besitzers von einer Sachverständigen-Kommission ausgeführt wurden, ergaben für die gesammte Anlage bei voller Belastung einen Wirkungsgrad von 80%. Die Untersuchungsmethode war die eben beschriebene. Die Leitung besteht aus blankem Kupferdraht von 8 mm Durchmesser, der wieder auf Oelisolatoren von Johnson und Phillips oberirdisch geführt wird; die Maschinen haben Hauptstromwicklung und sind so konstruiert, dass die Geschwindigkeit des Motors in Folge der Beziehung der Charakteristiken beider Maschinen sich selbst reguliert.

Die Hauptdaten dieser Maschinen sind folgende. Der Anker des Generators ist ein Grammescher Ring mit 504 Windungen. Jede derselben besteht aus zwei blanken Kupferdrähten von 3 mm Durchmesser, welche übereinanderliegen und mit Baumwolle isoliert sind. Der Kommutator besteht aus 126 Segmenten. Der Durchmesser des Ankerkerns beträgt 70 cm, seine Länge 50 cm und seine radiale Tiefe 14 cm. Die Magnetkerne haben einen Durchmesser von 40 cm. Auf jedem Schenkel sind 371 Windungen aus einem Draht von 9 mm Durchmesser angebracht. Der Ankerkern des Motors hat dieselbe Gestalt, ist jedoch nur mit 456 Windungen versehen, welche mit 114 Kommutatorsegmenten verbunden sind. Die Magnetkerne haben einen Durchmesser von 38 cm und sind in derselben Weise bewickelt, wie die Schenkel des Generators. Während der erwähnten Versuche schwankte die Geschwindigkeit des Generators zwischen 570 und 577 Umdrehungen in der Minute, diejenige des Motors zwischen 630 und 635 Umdrehungen¹⁾.

¹⁾ Die Anlage hat sich im Laufe mehrerer Jahre so bewährt, dass man jetzt beschlossen hat, sie auf 260 P.S. zu erweitern.

Additional material from *Elektrische Kraftübertragung*,
ISBN 978-3-642-49443-7 (978-3-642-49443-7_OSFO4),
is available at <http://extras.springer.com>



Für grössere Kräfte verwendet Brown multipolare Dynamomaschinen, wie sie Figur 146 zeigt. Die hier abgebildete Maschine ist eine vierpolige mit Grammeschem Ring. Aehnliche Maschinen waren auf der Pariser Weltausstellung 1889 im Betriebe, wo der Motor die Welle antrieb, mit welcher die verschiedenen in der Schweizer Abtheilung ausgestellten Maschinen verbunden waren. In den neuesten Maschinen dieses Typus wendet Brown Trommelanker an; Figur 147 zeigt eine solche Dynamomaschine, die für eine Leistung von 200 Am und 400 V bei einer Geschwindigkeit von 450 Umdrehungen in der Minute gebaut ist. Die Abmessungen sind in Meter gegeben. Wo man auf das Gewicht der Maschine keine Rücksicht zu nehmen braucht, sind die Feldmagnete aus Guss-eisen. Dienen die Maschinen jedoch speciell Beleuchtungszwecken, so bestehen die Feldmagnete aus einzelnen schmiedeeisernen Stücken. Diese sind durch Bolzen, welche im Inneren der erregenden Spulen liegen, zusammengehalten und statt auf einer gusseisernen Grundplatte auf einem Stahlrahmen befestigt. Bei der gewählten Ankerwicklung sind nur zwei Bürsten zur Stromabnahme nöthig. Diese sind um 180° von einander entfernt, wenn die Zahl der Polpaare eine ungerade ist; bei gerader Anzahl dagegen ist der Abstand der Bürsten gleich dem Abstand der Pole von einander. Bei einer sechs-, zehn- und vierzehnpoligen Maschine liegen die Bürsten einander gegenüber, während sie bei einer vier-, acht- oder zwölfpoligen Maschine um 90° , 45° oder 30° gegen einander versetzt sind. Die Kraftliniendichte ist in diesen neuen Maschinen bedeutend niedriger als in den älteren. Sowohl im Anker, wie auch in den Magnetschenkeln kommen nur 5000 bis 7000 Kraftlinien auf das Quadratcentimeter.

Berichtigungen.

- Seite 76, Zeile 11 v. o. lies Erg in der Sekunde statt Erg.
 - - - 15 - - Erg in der Sekunde statt Erg.
 - - - 18 - - Sekunden-Kilogrammmer statt Kilogrammmer.
 - 270, - 11 v. u. - vierpoligen Maschinen statt Maschinen.