

Universitäts- und Landesbibliothek Tirol

Encyklopaedie der Naturwissenschaften

Elektricität und Magnetismus

Winkelmann, Adolph August

Breslau, 1895

Technische Anwendungen der Induction

	Elektromagnetisch	Elektrostatisch
1 Volt	10^8	1/300
1 Ohm	10^9	$1/9 \cdot 10^{-11}$
1 Ampère	10^{-1}	$3 \cdot 10^9$
1 Coulomb	10^{-1}	$3 \cdot 10^9$
1 Farad	10^{-9}	$9 \cdot 10^{11}$

A. OBERBECK.

Technische Anwendungen der Induction.

I. Dynamoelektrische Maschinen. Kraftübertragung.

A. Historisches. Uebergang von den magnetelektrischen zu den dynamoelektrischen Maschinen.

Als man die früher¹⁾ beschriebenen magnetelektrischen Maschinen in grösseren Dimensionen ausführte und mit Benutzung stärkerer Triebkräfte aus ihnen Ströme entnahm, welche zu praktischen Zwecken, besonders zur Erzeugung von elektrischem Licht dienen konnten, stellte sich als ein Hauptmangel dieser Maschinen heraus, dass die Stahlmagnete ein verhältnissmässig schwaches Magnetfeld gaben und mit der Zeit einen grossen Theil ihres Magnetismus verloren. Man versuchte daher die Stahlmagnete durch Elektromagnete zu ersetzen, wobei letztere durch den Strom einer besonderen Stromquelle erregt wurden, bis schliesslich die geniale Entdeckung gemacht wurde, dass man den Maschinenstrom selbst zur Magnetisirung der Elektromagnete verwenden könnte.

Die Verwerthung dieses Gedankens eröffnete eine neue Aera in der Herstellung starker, elektrischer Ströme und in der Ausnutzung derselben für praktische Zwecke und bildet den Ausgangspunkt der modernen Elektrotechnik.

Dieselbe unterscheidet sich von den früheren technischen Anwendungen des elektrischen Stromes dadurch, dass:

- a) die benutzten Ströme hauptsächlich Inductionsströme sind und durch Aufwand von Arbeit erzeugt werden,
- b) dass dieselben von viel grösserer Intensität und mit erheblich geringeren Unkosten hergestellt werden können,
- c) dass das Gebiet der Anwendungen der elektrischen Ströme eine kaum geahnte Erweiterung erfährt und dass elektrische Centralen errichtet werden, welche an weite Kreise elektrische Ströme zu Beleuchtungszwecken und zum Betrieb von Motoren und Maschinen abgeben.

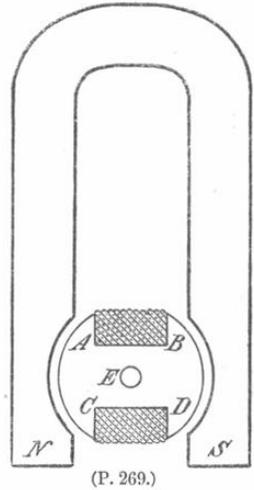
Unsere Aufgabe wird es daher sein, hier eine Uebersicht über die Vorrichtungen zur Erzeugung starker Ströme durch Aufwand von Arbeit zu geben und, da von der elektrischen Beleuchtung bereits früher die Rede war²⁾, den Betrieb von Maschinen durch elektrischen Strom, — die Kraftübertragung — zu besprechen.

¹⁾ Handbuch 3 (2), pag. 355.

²⁾ Handbuch 3 (1), pag. 410—417.

Wir beginnen mit einem Ueberblick über die Weiterentwicklung der magnetoelektrischen Maschinen.

Einen wesentlichen Fortschritt erfuhr die Construction derselben durch eine von WERNER SIEMENS im Jahre 1857 hergestellte Maschine, bei welcher eine neue Form des Inductors benutzt wurde. Derselbe wird als »Cylinderinductor« oder »Doppel-T-Inductor« bezeichnet. Die beistehende Fig. 269 giebt eine Vorstellung von demselben. Aus einem Eisencylinder E sind zwei Stücke in der Längsrichtung herausgeschnitten, deren Querschnitte AB und CD sind. Diese Ausschnitte sind mit Drähten ausgefüllt, welche in der Längsrichtung des Cylinders verlaufen und Windungen um letzteren bilden. Der Cylinderinductor rotirt zwischen den Polen N und S einer Reihe parallel gestellter Stahlmagnete. Der Vortheil dieser Anordnung liegt darin, dass die Induction elektromotorischer Kraft in den Drähten sich über einen grösseren Theil der Drehung erstreckt, als bei den älteren Maschinen. Allerdings findet auch hier ein Wechsel in der Richtung der inducirten elektromotorischen Kraft bei jeder halben Umdrehung statt. Doch kann durch einen geeigneten Commutator dem Strom in der äusseren Leitung stets dieselbe Richtung gegeben werden. Die SIEMENS'sche Maschine wurde anfänglich benutzt, um Lätewerke zu erregen, und fand eine grosse Verbreitung.



Im Jahre 1866 construirte H. WILDE eine Maschine von grosser Wirksamkeit, welche als eine Combination zweier SIEMENS'scher Maschinen bezeichnet werden kann. Jedoch besitzt die erste Maschine Stahlmagnete, die zweite Elektromagnete. Jene dient nur dazu, den zu der Erregung der Elektromagnete erforderlichen Strom zu liefern. Diese Maschine gab bereits recht starke Ströme. Immerhin war die Wirkungsweise derselben noch so complicirt, dass es als eine Entdeckung ersten Ranges bezeichnet werden muss, als es gelang, die Functionen der beiden Maschinen in einer einzigen zu vereinen. Wir verdanken dieselbe in erster Linie dem deutschen Fabrikanten und Gelehrten WERNER VON SIEMENS in Berlin. Im Januar des Jahres 1867 wurde die Abhandlung desselben: »Ueber die Umwandlung von Arbeitskraft in elektrischen Strom ohne Anwendung permanenter Magnete« durch G. MAGNUS der Akademie der Wissenschaften vorgelegt. In derselben geht SIEMENS¹⁾ von dem Gedanken aus, dass ein elektromagnetischer Motor, welcher aus einem festen und einem drehbaren Elektromagnet besteht und durch eine galvanische Kette getrieben wird, bei einer Drehung des beweglichen Theils durch eine äussere Kraft in demselben Sinne den Batterie-strom verstärkt und dadurch die feststehenden Elektromagnete stärker magnetisirt. Man kann nun die Kette ganz fortlassen. Der in den Elektromagneten nach einmaliger Wirkung der Kette zurückgebliebene Rest von Magnetismus genügt um zunächst schwache Inductionsströme in dem rotirenden Inductor zu erregen, Bei dem Durchgang derselben durch die Windungen des Elektromagnets wird der Magnetismus verstärkt. In Folge dessen nimmt die Intensität der Inductionsströme zu, allerdings auch die zu der Drehung aufzuwendende Arbeit. Schliesslich giebt die Maschine einen Strom von erheblicher Stärke.

¹⁾ W. SIEMENS, Berl. Monatsber. 1867, pag. 55—58; POGG. Ann. 130, pag. 332—335.

Die Abhandlung schliesst mit den Worten:

»Der Technik sind gegenwärtig die Mittel gegeben, elektrische Ströme von unbegrenzter Stärke auf billige und bequeme Weise überall da zu erzeugen, wo Arbeitskraft disponibel ist.«

Die erste nach diesem Princip stromliefernde Maschine war von der zuvor beschriebenen SIEMENS'schen Construction. Doch waren die Stahlmagnete durch Elektromagnete ersetzt, deren Windungen ebenfalls in den Stromkreis des Inductors eingeschaltet waren. Dieselbe befand sich auf der Weltausstellung in Paris im Jahre 1867. Die Drehung wurde mit der Hand ausgeführt. Die Maschine war zur Zündung von Minen bestimmt.

Die Abhandlung von WERNER SIEMENS wurde von seinem Bruder WILLIAM SIEMENS in der Sitzung der Royal-Society am 14. Februar 1867 vorgetragen. In derselben Sitzung hielt auch CHARLES WHEATSTONE¹⁾ einen Vortrag: »*On the augmentation of the power of a magnet by the reaction thereon of currents induced by the magnet itself*«, in welchem eine Maschine von ähnlicher Construction beschrieben, und ihre Wirksamkeit auf gleiche Weise wie von SIEMENS erklärt wird.

Hiernach hat also WERNER SIEMENS unzweifelhaft das Verdienst, den Grundgedanken für die Construction der neuen Maschinen, den man häufig als das »dynamoelektrische Princip« bezeichnet, zuerst ausgesprochen zu haben. — Die weitere Entwicklung der dynamoelektrischen Maschinen bestand hauptsächlich in der zweckmässigen Gestaltung der einzelnen Theile derselben, besonders in der Herstellung der Formen des rotirenden Inductors, sowie der Vorrichtungen, mit deren Hilfe die inducirten Ströme aus den Windungen des Inductors in die weitere Leitung übergeführt werden.

Je nach der Beschaffenheit dieser Vorrichtung gehen in die Leitung gleichgerichtete Ströme oder Wechselströme. Dem entsprechend unterscheiden wir: Gleichstrommaschinen und Wechselstrommaschinen.

Bevor ich zu einer kurzen Beschreibung dieser Maschinen übergehe, bemerke ich, dass hier nur die Hauptpunkte hervorgehoben werden können, während ich für alle technischen Einzelheiten auf die folgenden Specialwerke verweise:

H. SCHELLEN. Die magnet- und dynamoelektrischen Maschinen, ihre Entwicklung, Construction und praktische Anwendung. Köln 1879.

SYLVANUS THOMPSON. Dynamo-Electric Machinery. London 1884, deutsch von GRAWINKEL. Halle a. S. 1890.

O. FRÖLICH. Die dynamoelektrische Maschine. Berlin 1886.

E. KITTLER. Handbuch der Elektrotechnik. Erste Auflage. Stuttgart. Band 1 1886. Band 2 (erste Hälfte) 1890.

GUSTAV GLASER DE CEW. Die Construction der magnetelektrischen und dynamoelektrischen Maschinen (fünfte Auflage, bearbeitet von F. AUERBACH). A. HARTLEBEN's Verlag 1887.

F. AUERBACH. Die Wirkungsweise der dynamoelektrischen Maschinen. A. HARTLEBEN's Verlag. 1887.

E. KITTLER. Handbuch der Elektrotechnik. (Zweite Aufl.) Bd. 1, Stuttgart 1892.

B. Gleichstrommaschinen. Construction und Wirkungsweise derselben.

Trotz weitgehender Verschiedenheiten in den Einzelheiten der Construction dieser Maschinen beruht die Erzeugung des elektrischen Stromes durch dieselben auf gleichen Grundprincipien.

¹⁾ CH. WHEATSTONE, Proc. Roy. Soc. 15, pag. 369—372. 1867.

Wir wollen dieselben hier im Anschluss an das Beispiel einer GRAMME'schen Maschine auseinander setzen.

Der »Inductor« dieser Maschine, auch »Armaturo« oder »Anker« genannt, besteht aus einem Eisenring oder vielmehr aus einem eisernen Hohlzylinder. Derselbe ist gleichmässig von Drahtwindungen umschlungen und wird zwischen zwei entgegengesetzten Magnetpolen um die Cylinderaxe in Rotation versetzt. In jeder einzelnen Windung werden dann bei der Drehung Ströme inducirt, welche in jedem Augenblick von der relativen Bewegung der Windung gegen die Pole und von der Magnetisirung der Eisenmasse des Ringes abhängen.

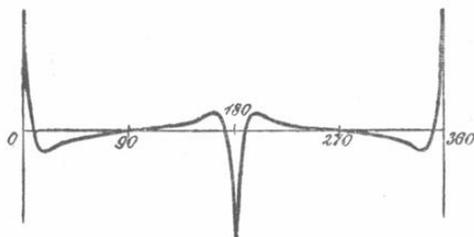
Die Grundidee dieser Anordnung war bereits im Jahre 1860 von PACINOTTI¹⁾ angegeben worden. Die Beschreibung der GRAMME'schen Maschine wurde der Pariser Akademie im [Jahre 1871²⁾] vorgelegt. Der Inductor wird gewöhnlich als PACINOTTI-GRAMME'scher Ring bezeichnet.

Zum Verständniss der Induction in einer Windung bei den verschiedenen Lagen, welche dieselbe bei einer ganzen Umdrehung durchläuft, wollen wir hier kurz die Resultate einer Untersuchung von A. ISENBECK³⁾ über die Induction in einer Reihe einfacherer Fälle mittheilen. Es war dabei die folgende Anordnung getroffen. Eine Drahtrolle R (Fig. 270) kann auf einem Ring HH' aus einer beliebigen Anfangslage um eine kleine, sich aber stets gleichbleibende Strecke verschoben werden. Die Drahtenden sind mit einem Galvanometer verbunden. Erfolgt die Verschiebung in einem magnetischen Kraftfeld, so wird ein Inductionstrom erzeugt, dessen Stärke ein Maass für die Aenderung des Kraftflusses durch die Rolle ist.

Die Anfangslage der Rolle wird durch eine an dem Ringe angebrachte Kreistheilung von $0-360^\circ$ bestimmt. An derselben wird die Rolle von 5 zu 5 Graden weiter verschoben und dann jedesmal die oben besprochene kleine Drehung vorgenommen.

Zur Erzeugung des Magnetfeldes dienten hauptsächlich die folgenden Anordnungen.

a) Zwei Magnetstäbe N_1S_1 und N_2S_2 (Fig. 270) liegen einander diametral so gegenüber, so dass die Pole N_1 und S_2 den Punkten 0° und 180° der Kreistheilung entsprechen. Das Magnetfeld rührt hauptsächlich von der Wirkung dieser beiden Pole her.



(P. 271.)

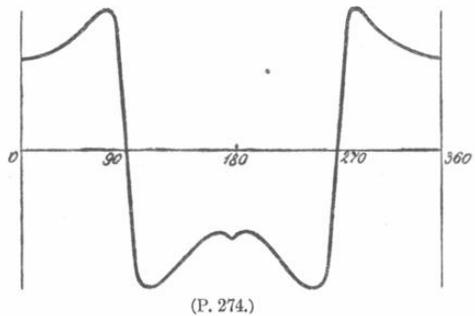
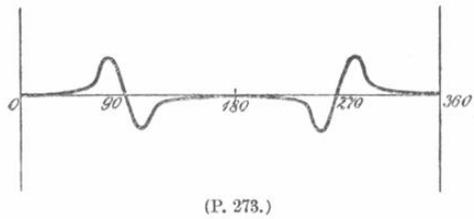
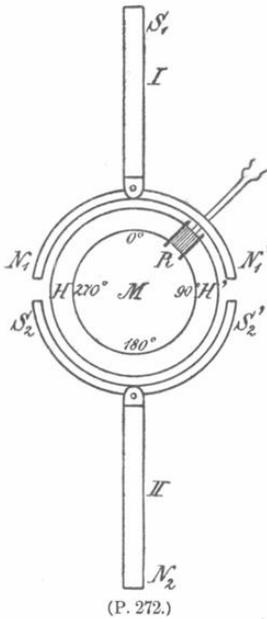
Die inducirten elektromotorischen Kräfte für die verschiedenen Anfangslagen der Rolle sind durch die Curve der Fig. 271 dargestellt. Dieselbe zeigt zwei Hauptmaxima für 0° und 180° , Zeichenwechsel bei 90° und 270° , ausserdem aber noch in jedem Quadranten einen weiteren Wechsel des Vorzeichens.

1) PACINOTTI, Nuovo Cimento 19. 1863.

2) GRAMME, Compt. rend. 73, pag. 175—178; vergl. auch PACINOTTI, Compt. rend. 73, pag. 543—544. 1871.

3) A. ISENBECK, Elektrot. Zeitschr. 4, pag. 237—342; pag. 362—366. 1883.

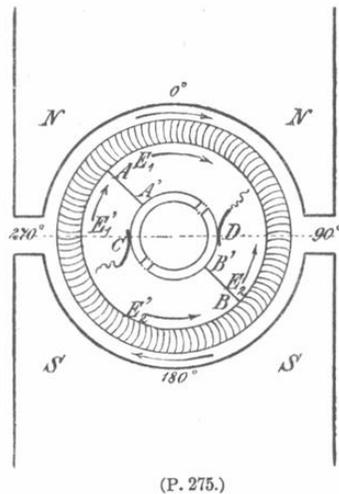
b) Die beiden Magnetstäbe sind mit halbkreisförmigen Polschuhen versehen (Fig. 272), so dass jetzt die Hauptwirkung von den Punkten N_1, N'_1, S_2, S'_2 ausgeht. Die elektromotorischen Kräfte sind in der Curve der Fig. 273 dargestellt. Es sind jetzt fast nur noch Inductionswirkungen (von entgegengesetztem Zeichen) bei 90° und 270° vorhanden.



c) Dieselbe Anordnung wie zuvor; doch ist jetzt der Holzring, auf welchem die Rolle R verschoben wird, durch einen Ring von weichem Eisen ersetzt. Die Inductionswirkungen (Fig. 274) sind dadurch überall erheblich stärker geworden. Sie erstrecken sich über alle Lagen der Rolle und erfahren bei 90° und 270° einen schroffen Wechsel des Vorzeichens.

Diese Anordnung entspricht im Allgemeinen dem Vorgang bei den dynamoelektrischen Maschinen.

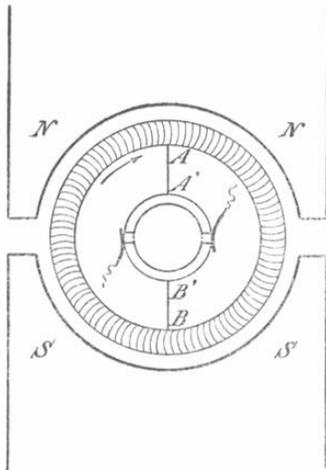
Nehmen wir an, der gleichmässig mit Windungen bedeckte GRAMME'sche Eisenring erfahre in dem Magnetfeld zweier mit Polschuhen versehener Elektromagnete eine kleine Drehung. Alle zwischen 90° und 270° gelegenen Windungen enthalten gleichgerichtete elektromotorische Kräfte. In allen übrigen Windungen haben dieselben auch gleiche, aber der vorigen Kraft entgegengesetzte Richtung.



Verbindet man zwei diametral gegenüberliegende Punkte der Windungen A und B mit einem auf der Drehungsaxe aufsitzenden Comutator, welcher aus zwei isolirten Halbringen A' und B' besteht, so überwiegt bei

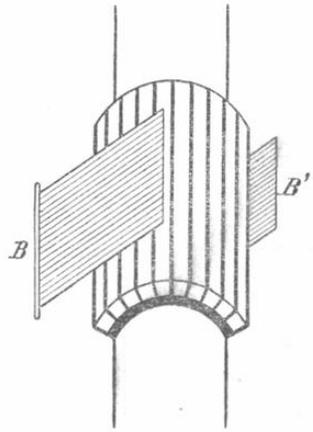
der in Fig. 275 dargestellten Lage des Ringes in der einen Ringhälfte die elektromotorische Kraft E_1 über E_2 , in der anderen E'_2 über E'_1 , so dass von

den Schleifedern C und D ein elektrischer Strom in eine Leitung getrieben wird, welche C mit D verbindet. Bei weiterer Drehung des Ringes wird aber die Spannungsdifferenz von CD kleiner, bis dieselbe bei der Stellung der Fig. 276 verschwindet. Hierbei geht die Schleiffeder C von A' auf B' und D von B' auf A' über.



(P. 276.)

Wird die Drehung stets in demselben Sinne fortgesetzt, so wächst die elektromotorische Kraft wieder, während der Strom in der äusseren Leitung dieselbe Richtung annimmt wie zuvor.



(P. 277.)

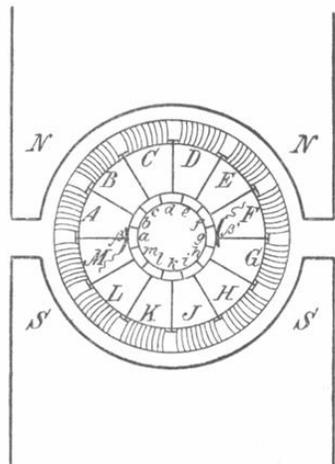
Auf diese Weise werden zwar in der Drahtverbindung CD stets Ströme derselben Richtung fließen. Da aber die elektromotorische Kraft bei jeder Umdrehung zweimal auf Null sinkt und dazwischen zwei Maxima liegen, so erfahren die Ströme erhebliche Schwankungen ihrer Intensität.

Um diesen Uebelstand zu vermeiden, werden die Windungen des Inductors in eine grössere Anzahl einzelner Spulen zerlegt. Von jeder Verbindung zweier auf einander folgender Spulen führt ein Draht zu einer besonderen, für die dynamoelektrischen Maschinen charakteristischen Vorrichtung, welche als »Collector« oder »Commutator« bezeichnet wird.

Derselbe besteht (Fig. 277) aus einem auf der Drehungsaxe aufsitzen, isolirenden Hohlcylinder, welcher mit Kupferstreifen bedeckt ist, die ebenfalls von einander isolirt sind. Auf dem Cylinder schleifen die »Bürsten« BB' , welche gewöhnlich aus einer Anzahl paralleler Kupferdrähte oder aus Drahtgeweben bestehen.

Die Wirksamkeit des Collectors ist am besten aus Fig. 278 zu erkennen. Hier ist angenommen, dass die ganze Wicklung aus den Einzelspulen A bis M besteht. Von der Verbindungsstelle je zweier aufeinander folgender Spulen führt ein Draht nach einem Streifen des Collectors (a bis m). Die Bürsten sind durch β und β' dargestellt.

Bei der augenblicklichen Stellung des Ringes geben A bis F gleichgerichtete Kräfte, ebenso G bis M . Die Bürsten führen den Strom durch Vermittlung der Streifen a und g des Collectors in die Leitung. Bei fortgesetzter Drehung tritt jedesmal die folgende Windung an Stelle der vorangehenden, ebenso der nächste Streifen an Stelle des benachbarten, so dass die Wirkung unverändert bleibt. Nur bei dem Uebergang der Bürste β von a auf m resp. der Bürste β' von f



(P. 278.)

auf g tritt ein Augenblick ein, wo die Streifen a mit m und f mit g leitend verbunden sind. Dadurch sind die Spulen M und G in dieser Zeit in sich kurz geschlossen. Sie sind also in dieser Zeit elektromotorisch für den äusseren Stromkreis unwirksam. Hierdurch wird eine Stromschwankung bedingt, welche um so geringer ausfällt, je grösser die Anzahl der Spulen ist, in welche die ganze Wickelung zerfällt.

Sehen wir hiervon ab, so kann man also die Inductionswirkung in dem Ring so auffassen, als ob in jeder Hälfte desselben (Fig. 279) dieselbe constante elektromotorische Kraft E ihren Sitz hat und beide Ringhälften nebeneinander geschaltet sind.

Bei der Berechnung der Stromstärke in der weiteren Leitung BB' würde daher die elektromotorische Kraft E dem Produkt aus der Stromstärke (J) und dem Widerstand der äusseren Leitung W , vermehrt um das Produkt aus der Stromstärke (i) in der einen Ringhälfte und dem Widerstand $w/2$ derselben nach den Regeln für constante Ströme gleichzusetzen sein. Also:

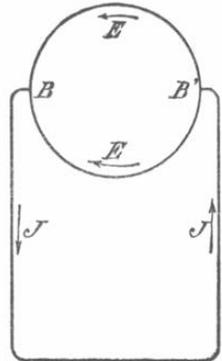
$$E = J \cdot W + i \frac{w}{2}.$$

Da ausserdem:

$$J = 2i,$$

so ist:

$$E = J \left(W + \frac{w}{4} \right).$$



(P. 279.)

Man kann daher weitere Rechnungen auch so ausführen, dass man den weiteren Theil des Widerstandes der Ankerwindungen einführt. Der von den Bürsten ausgehende Strom durchläuft dann zunächst die Windungen der Elektromagnete und dann die ausserhalb der Maschine liegende Leitung.

Wie früher auseinandergesetzt, besitzt das Eisen der Elektromagnete einen Rest von Magnetismus. Durch die Induction in den Ankerwindungen entsteht daher zunächst ein schwacher Strom, der den Magnetismus vermehrt. Bei gleichmässiger Drehung des Inductors wachsen daher Magnetismus und Inductionstrom gleichzeitig. Man nennt diesen, in kurzer Zeit sich abspielenden Vorgang das »Angehen« der Maschine. Bald erreichen Magnetismus und Stromstärke einen gewissen Grenzzustand. Derselbe hängt von der Rotationsgeschwindigkeit des Ankers, von der Construction desselben, sowie der Elektromagnete, von den Widerständen der Ankerwindungen, der Elektromagnetwindungen und der weiteren Leitung ab.

Bevor wir auf die Berechnung dieses Grenzzustandes eingehen, sollen kurz die verschiedenen Constructionen der Haupttheile der gebräuchlichsten Maschinen besprochen werden.

C. Gleichstrommaschinen. Hauptbestandtheile derselben.

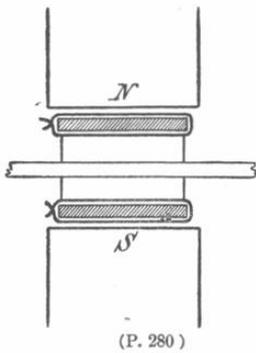
Eintheilung der Gleichstrommaschinen nach den verschiedenen Schaltungsweisen.

Die Haupttheile der Gleichstrommaschinen sind: der Inductor (Armatur oder Anker) und die Elektromagnete. Als Inductoren sind hauptsächlich im Gebrauch:

der Ringinductor, der Trommelinductor, der Scheibeninductor.

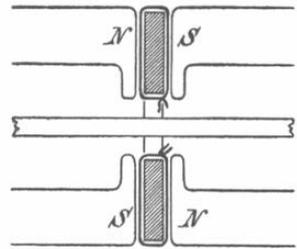
a) Von dem Ringinductor war bereits die Rede. Je nach der Form der ringförmigen Eisenmassen unterscheidet man: den PACINOTTI-GRAMME'schen Ring und den Flachring.

Der GRAMME'sche Ring (Fig. 280) besteht aus einem eisernen Hohlcylander von grösserer Höhe und geringerer Wanddicke. Bei demselben findet während



(P. 280)

der Rotation die Hauptinductionswirkung nur in denjenigen Strecken der Umwindung statt, welche den Elektromagneten zugekehrt sind, während für die inneren Theile der Ring selbst als Schirm wirkt. In Folge dessen gab SCHUCKERT (1876) dem Ring eine andere Form, welche Fig. 281 zeigt. Hier wirkt die Induction

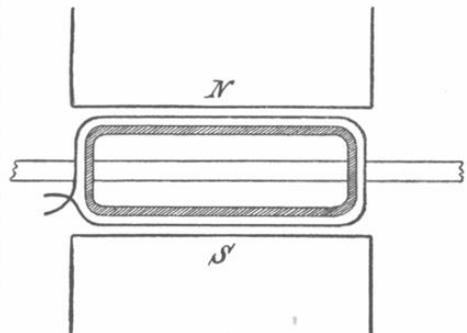


(P. 281.)

auf beiden Seiten der Wickelung gleichmässig.

b) Der Trommelanker wurde 1872 von v. HEFNER-ALTENECK angegeben und zuerst hauptsächlich von SIEMENS und HALSKE angewandt. Derselbe besteht (Fig. 282) aus einem eisernen, oben und unten geschlossenen Hohlcylander, um welchen die Drahtwindungen aussen herumgelegt sind.

Um die Windungen gleichmässig über die Seitenfläche zu vertheilen, ihre Anhäufung an den beiden Endflächen aber zu vermeiden, ist es nöthig, der Wickelung eine besondere Anordnung zu geben, die wir aber hier nicht näher beschreiben können.



(P. 282.)

c) Der seltener benutzte Scheibenanker schliesst sich an die Inductoren der älteren magnet-elektrischen Maschinen an. Ein flacher Cylinder ist mit Windungen um seinen Mantel versehen. Die Induction erfolgt, indem derselbe an den Magnetpolen vorüber oder zwischen denselben so hindurchgeführt wird, dass die Kraftlinien der Axe parallel verlaufen.

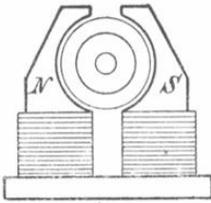
Nach der Form und Construction der Elektromagnete kann man die Gleichstrommaschinen in die folgenden Klassen eintheilen¹⁾:

- 1) Zweipolige Maschinen:
 - a) Einfaches Hufeisen.
 - b) Doppelmagnet mit Folgepolen.
 - c) Eisenrückschlusstypus.
- 2) Mehrpolige Maschinen.
 - a) Aussenpolmaschinen.
 - a) Folgepoltypus.
 - b) Eisenrückschlusstypus.
 - c) Typus mit gesonderten Hufeisen.
 - β) Innenpolmaschinen.

Wir müssen uns hier begnügen einzelne Beispiele anzuführen. Fig. 283 giebt die Form des Elektromagnets einer Maschine von SIEMENS und HALSKE. Der-

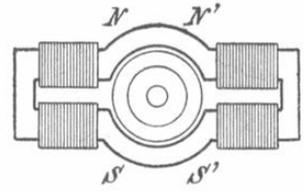
¹⁾ Nach E. KITTLER, Handbuch der Elektrotechnik (2. Auflage), Band I, pag. 618.

selbe besteht aus einem aufrechtstehenden Hufeisen. Zwischen den abgeschrägten Polschuhen bewegt sich der Anker (1a). Fig. 284 zeigt einen Doppelmagnet mit Folgepunkten, von denen die Inductionswirkung auf den rotirenden Anker ausgeht (1b).



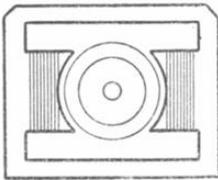
(P. 283.)

Bei der fortschreitenden Entwicklung der dynamoelektrischen Maschinen wurde, je länger, je mehr Rücksicht auf die Vermeidung der Streuung der magnetischen Kraftlinien genommen. Dem entsprechend



(P. 284.)

wurde besonders für eine möglichst vollkommene, magnetische Leitung Sorge getragen. Fig. 285 giebt die Anordnung bei einer Maschine von LAHMEIER, bei welcher die Elektromagnete oben und unten durch Eisenmassen verbunden sind (1c).



(P. 285.)

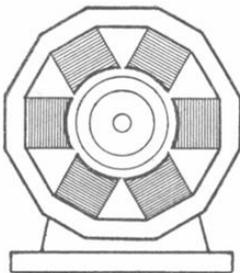
Bei den bisher beschriebenen Maschinen waren stets nur zwei Pole von entgegengesetztem Vorzeichen wirksam. Soll eine Maschine besonders starke Ströme geben, so kann man den Inductionsvorgang bei einer Umdrehung vervielfältigen, indem man eine grössere Anzahl von Polen mit abwechselnden Vorzeichen auf den rotirenden Anker

wirken lässt. Derartige Maschinen werden als mehrpolige bezeichnet.

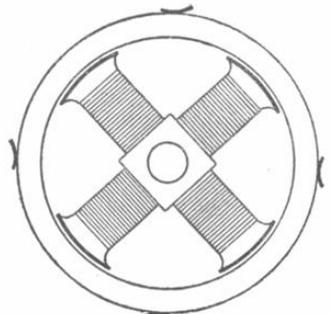
Man kann dann entweder durch entsprechende Vervielfältigung der Bürsten an dem Collector, welche jedesmal die Spulen beim Durchgang durch die neutrale Zone ableitend berühren und durch Verbindung der Bürsten mit gleichem Vorzeichen die Stromstärke proportional der Anzahl der Polpaare vervielfältigen. Man bezeichnet diese Anordnung als mehrpolige Maschinen mit Parallelschaltung. Oder man kann durch passende Verbindung derjenigen Spulen, in welchen gleichgerichtete Ströme inducirt werden, die elektromotorische Kraft entsprechend vermehren. In diesem Fall sind nur zwei Bürsten an dem Collector

vorhanden. Diese Maschinen heissen mehrpolige Maschinen mit Reihenschaltung.

Rotirt der Anker im Innern des Polkreises, so dass also die Pole ausserhalb desselben liegen, so bezeichnet man die Maschinen als Aussenpolmaschinen. Fig. 286 giebt ein Beispiel dieser Anordnung



(P. 286.)

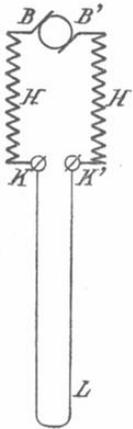


(P. 287.)

nach einer Maschine der Maschinenfabrik Oerlikon. Die 6 Elektromagnete haben Pole von abwechselnden Zeichen und sind durch einen Eisenkranz verbunden. Wird umgekehrt ein sehr grosser Ring benutzt, in dessen Innern die Pole angebracht sind, so erhält man eine Innenpolmaschine. Fig. 287 zeigt eine solche Maschine, wie sie von SIEMENS und HALSKE ausgeführt wird. Bei derselben fällt der Collector ganz fort. Die Wicklung des Ankerringes ist so eingerichtet, dass die Bürsten von der Aussenseite derselben unmittelbar den Strom ent-

nehmen können. Diese Maschinen eignen sich besonders für Centralen resp. für Ausführung in sehr grossen Dimensionen.

Bei den ersten, dynamoelektrischen Maschinen ging der Strom von den Bürsten des Ankers durch die Windungen der Elektromagnete und durch die äussere Leitung. Da hiernach die Stärke desselben von dem Gesamtwiderstand dieser drei Theile des Stromkreises abhängt, von dem Strom aber gleichzeitig



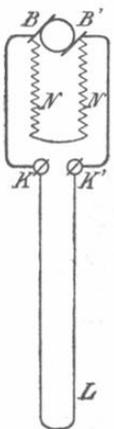
(P. 288.)

die Stärke des Magnetfeldes und von dieser wieder die elektromotorische Kraft bedingt wurde, so ist zu übersehen, dass bei grösseren Widerständen der äusseren Leitung die Wirksamkeit der Maschine nur eine geringe sein konnte. Dem entsprechend wurde später der Stromverlauf in verschiedenartiger Weise verändert resp. verzweigt.

Man kann in dieser Beziehung die folgenden Klassen von Maschinen unterscheiden:

- 1) Hauptstrommaschinen, Reihenmaschinen, Serienmaschinen, Maschinen mit direkter Wickelung.
- 2) Nebenschlussmaschinen.
- 3) Maschinen mit gemischter Wickelung, Compound- oder Verbundmaschinen.

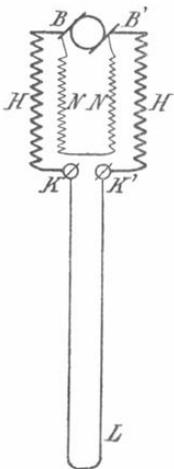
Bei der ersten Klasse (Fig. 288) fliesst der Strom von der Bürste B des Ankers durch die Windungen H des Elektromagnets nach dem Anfangspunkt (Polklemme) K der äusseren Leitung L und über dieselbe durch die andere Polklemme K' nach der Bürste B' .



(P. 289.)

Bei der zweiten Klasse (Fig. 289) verzweigt sich der Strom an den Bürsten.

Der eine Zweigstrom geht durch die Windungen (N) des Elektromagnets, der andere durch die äussere Leitung.



(P. 290.)

Bei der dritten Klasse sind die Elektromagnete mit zwei Lagen von Windungen versehen. Die eine Lage — die Hauptwicklung oder die direkte Wickelung (H) — besteht aus einer kleinen Anzahl von Windungen eines dickeren Drahts; die andere, — die Nebenwicklung (N) — aus einer grösseren Anzahl von Windungen von dünnerem Draht.

Es sind nun die folgenden beiden Anordnungen im Gebrauch.

a) Der Strom verzweigt sich an den Bürsten B, B' (Fig. 290).

Der eine Zweig besteht aus der Hauptwicklung und aus der äusseren Leitung, der

andere aus der Nebenwicklung (Nebenschluss parallel zum Anker).

b) Der Strom durchläuft die Hauptwicklung und verzweigt sich dann an den Polklemmen K, K' (Fig. 291), so dass der eine Zweig aus der Nebenwicklung besteht. (Nebenschluss parallel zur Leitung.)

Während die Anwendung der Hauptschlussschaltung nur bei geringem äusseren Widerstand vortheilhaft sein kann, ist umgekehrt die Nebenschlusschaltung bei grossem äusseren Widerstand zweckmässig. Die dritte Anordnung vereinigt die Vorteile beider Anordnungen. Gewöhnlich ist bei derselben in den Zweig des

Nebenschlusses noch ein veränderlicher Widerstand eingeschaltet, mit dessen Hilfe man die Spannung an den Polklemmen auf einer constanten Höhe erhalten kann, wenn auch in der äusseren Leitung die Widerstände und damit die Stromstärke variirt werden.

Die dabei vorkommenden Verhältnisse, wie überhaupt die Stromstärke der Maschine in ihrer Abhängigkeit von den in Betracht kommenden Faktoren liefert uns die Theorie der Gleichstrommaschinen.

D. Theorie der Gleichstrommaschinen.

Wird der Anker einer dynamoelektrischen Maschine in gleichmässige Rotation versetzt und gleichzeitig eine leitende Verbindung zwischen den beiden Bürsten hergestellt, so wird anfänglich nur ein schwacher Strom inducirt, welcher dem permanenten Magnetismus der Elektromagnete entspricht. Dann aber wachsen Magnetismus und Stromstärke, indem sie sich gegenseitig verstärken, bis sie einen Grenzwert erreichen.

Dieser Vorgang — die Selbsterregung oder das Angehen der Maschinen — ist mehrfach¹⁾ untersucht worden. Insbesondere fand F. AUERBACH, dass bei jedem remanenten Magnetfeld die Rotationsgeschwindigkeit des Ankers einen gewissen Grenzwert übersteigen muss, wenn überhaupt ein Ansteigen des Magnetismus und der Stromstärke stattfinden soll. Dieser kritische Werth der Rotationsgeschwindigkeit nimmt mit der Stärke des remanenten Magnetfeldes ab.

Die Zeit des veränderlichen Zustandes hängt von mannigfaltigen Umständen ab. Dieselbe betrug bei einer SIEMENS'schen Hauptschlussmaschine nach Versuchen von O. FRÖHLICH, bei welchen die Stärke des Stromes durch einen schnell laufenden Russschreiber aufgezeichnet wurde, je nach der Grösse des eingeschalteten Widerstandes: 1·5—5 sec.

Haben Magnetismus und Stromstärke ihre Grenzwerte erreicht, so ist das »dynamoelektrische Gleichgewicht« eingetreten. Dasselbe erhält sich so lange, als die Bedingungen, unter denen der Vorgang verläuft, unverändert bleiben. Wir haben es dann also nicht mehr mit veränderlichen, sondern mit constanten Grössen, insbesondere auch mit constanten Strömen zu thun.

Es ist nun die Aufgabe der Theorie, den gesetzmässigen Zusammenhang zwischen den hier in Betracht kommenden Grössen: der Tourenzahl (Anzahl der Drehungen in der Minute) der elektromotorischen Kraft, den Widerständen und den Stromintensitäten zu ermitteln.

Wie bei einer magnet-elektrischen Maschine hängt auch bei der dynamoelektrischen Maschine die inducirte elektromotorische Kraft ab:

- a) von der Tourenzahl,
- b) von der Stärke des Magnetfeldes, in welchem der Anker rotirt.

Während bei den älteren magnet-elektrischen Maschinen die Abhängigkeit der elektromotorischen Kraft von der Tourenzahl durch eine complicirtere Function auszudrücken ist²⁾, ist dieselbe bei den dynamoelektrischen Maschinen der Tourenzahl nahezu proportional, wenn das Magnetfeld durch einen besonderen Strom, welcher durch die Windungen der Elektromagnete geleitet wird, constant erhalten wird.

¹⁾ H. HERWIG, WIED. ANN. 7, pag. 193—206. 1879. — F. AUERBACH, WIED. ANN. 34, pag. 172—180. 1888. — O. FRÖHLICH, die dynamoelektrische Maschine, pag. 172—183. 1886.

²⁾ Vergl. Handbuch 3 (2), pag. 357.

Bezeichnet man daher die elektromotorische Kraft mit E , die Tourenzahl mit v , so kann man von der Fundamentalgleichung ausgehen:

$$E = f \cdot v \cdot M. \quad (1)$$

In derselben ist f eine Constante, (die Anker-Constante), welche von der Beschaffenheit des Ankers insbesondere der Anzahl der Windungen desselben abhängt, während M eine Function der Stromstärke ist und die Stärke des Magnetfeldes repräsentirt.

Ist der Gesamtwiderstand der Leitung W , die Stromstärke J , so ist nach dem OHM'schen Gesetz:

$$E = JW. \quad (2)$$

Also:

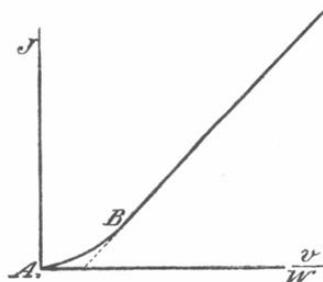
$$J = fM \frac{v}{W}. \quad (3)$$

Bei einer Maschine mit constantem Magnetfeld (Stahlmagneten) ist daher die Stromstärke dem Quotienten aus Tourenzahl und Widerstand proportional. Ferner ist die elektromotorische Kraft von der Stromstärke unabhängig. Diese Sätze sind indess nicht streng richtig, da bei stärkeren Strömen der Magnetismus des Ankers eine Schwächung des Magnetfeldes bewirkt.

Sehen wir von diesem Umstand, der sich auch bei der dynamoelektrischen Maschine geltend macht, ab, so kann man bei derselben M als eine Function der Stromstärke ansehen. Daraus folgt, dass letztere in erster Annäherung als eine Function des Quocienten $\frac{v}{W}$ zu betrachten ist.

Es ist also:

$$J = F \left(\frac{v}{W} \right). \quad (4)$$



Zur Ermittlung dieser unbekanntenen Function mussten geeignete Versuche angestellt werden. Bei denselben wurde die Stromstärke und der Widerstand des Stromkreises gemessen, während die Tourenzahl bei constantem Widerstand oder der Widerstand bei constanter Tourenzahl verändert wurde. Als Resultate derselben¹⁾ ergab sich, dass die betreffende Function, wenigstens für grössere Werthe der Veränderlichen, als eine gerade Linie anzusehen ist, welche die positive Seite der Abscissenaxe (vergl. Fig. 292) schneidet.

Da J für $\frac{v}{W} = 0$, verschwinden muss, so entspricht der untere Theil der Geraden nicht den wirklichen Verhältnissen, sondern ist durch das Stück AB zu ersetzen.

Da es sich aber bei einer für die Praxis ausreichenden Theorie der Gleichstrommaschinen hauptsächlich um den Fall handelt, wo dieselben stärkere Ströme geben, so ist dieselbe so zu formuliren, dass die Stromstärke als Function von $\frac{v}{W}$ durch eine Gerade dargestellt wird. Zu dem Zweck ist die Stärke des Magnetfeldes M , der »wirksame Magnetismus«, durch eine geeignete Function der Stromstärke auszudrücken. Hierbei ist das Verhalten von Eisenkernen bei

¹⁾ O. E. MEYER und F. AUERBACH, WIED. Ann. 8, pag. 494—514. 1879. — O. FRÖLICH, Elektrot. Zeitschr. 2, pag. 134—140, 170. 1881. — Vergl. auch O. E. MEYER und F. AUERBACH, Elektrot. Zeitschr., pag. 240. 1886, und O. FRÖLICH, Elektrot. Zeitschr. 7, pag. 161. 1887.

starken, magnetisirenden Kräften zu berücksichtigen, Während der Magnetismus bei schwächeren Kräften der magnetisirenden Kraft proportional ist, wächst derselbe bei stärkeren Kräften langsamer und nähert sich einem oberen Grenzwert. O. FRÖLICH, dessen Theorie der Gleichstrommaschinen wir hier wiedergeben, hat dementsprechend M als Function der magnetisirenden Kraft X durch die einfache Formel

$$M = \frac{\mu X}{1 + \mu X} \quad (5)$$

ausgedrückt. In derselben ist der obere Grenzwert von M (für $X = \infty$) als Einheit angenommen.

Die magnetisirende Kraft X ist der Anzahl der Windungen auf dem Elektromagnet (m) und der Stromstärke proportional. Hiernach kann man setzen:

$$X = mJ$$

und:

$$M = \frac{\mu m J}{1 + \mu m J}. \quad (7)$$

Setzt man diesen Werth in (3) ein, so ist:

$$J = \frac{f \mu m J v}{W(1 + \mu m J)} \quad (8)$$

oder:

$$J = \frac{fv}{W} - \frac{1}{\mu m}. \quad (9)$$

Die Stromcurve zeigt also denselben Verlauf, welcher aus den besprochenen Versuchen folgt und rechtfertigt daher die Wahl der Gleichungen (4) und (5) für den Magnetismus als Function der magnetisirenden Kraft.

Werden diese Gleichungen als allgemein gültig angenommen, so kann daraus die Theorie der Gleichstrommaschinen für die verschiedenen Schaltungen abgeleitet werden.

Bevor wir hierzu übergehen, führen wir noch eine Reihe von neuen Grössen ein.

Ausser der Stromstärke in dem äusseren Stromkreis ist der Beobachtung leicht zugänglich die Potentialdifferenz an den Enden der äusseren Leitung, die Polspannung oder Klemmenspannung P . Ist J die Stromstärke in der äusseren Leitung, u der Widerstand derselben, so ist

$$P = uJ. \quad (10)$$

Als Nutzeffekt (l) der Maschine bezeichnet man die elektrische Arbeit des äusseren Stromkreises. Es ist also:

$$l = P \cdot J. \quad (11)$$

Der Gesamteffekt (L) ist die Stromarbeit im Anker. Wird die Stromstärke in demselben durch J_a bezeichnet, so ist:

$$L = E \cdot J_a. \quad (12)$$

Güteverhältniss oder Wirkungsgrad der Maschine (λ) ist das Verhältniss des Nutzeffektes zu dem Gesamteffekt. Es ist also

$$\lambda = \frac{l}{L} = \frac{P \cdot J}{E \cdot J_a}. \quad (13)$$

Hiernach gehen wir zu den einzelnen Schaltungen der Gleichstrommaschinen über.

1) Hauptstrommaschinen.

Fundamentalgleichungen:

$$E = \frac{fv \mu m J}{1 + \mu m J} = W \cdot J. \quad (14)$$

Aus denselben folgt:

$$J = \frac{fv}{W} - \frac{1}{m\mu}, \quad (15)$$

$$E = fv - \frac{W}{\mu m}, \quad (16)$$

$$P = \frac{fvu}{W} - \frac{u}{\mu m}, \quad (17)$$

$$\lambda = \frac{u}{W}.$$

Der Gesamtwiderstand besteht aus dem Widerstand des Ankers (a), dem Widerstand der Windungen der Elektromagnete (b) und dem Widerstand der äusseren Leitung. Es ist also:

$$W = a + b + u.$$

Fassen wir die berechneten Grössen als Functionen des äusseren Widerstandes u auf, so folgt:

a) Die Stromstärke nimmt mit wachsendem Widerstand erst schnell, dann langsamer ab und erreicht für eine endliche Grösse von u den Werth Null.

b) Die elektromotorische Kraft wird durch eine gerade Linie dargestellt. Sie nimmt mit wachsendem u ab und wird ebenfalls 0.

c) Die Polspannung ist Null für $u = 0$, durchläuft ein Maximum und wird für einen grösseren Werth von u wiederum Null.

Dass die Werthe von J , E und P für einen grossen Werth von u verschwinden, entspricht nicht der Wirklichkeit. Jedenfalls zeigen aber die Formeln, dass alle diese Grössen für grössere Widerstände der äusseren Leitung sehr klein werden. Gerade um diesem Nachtheil abzuhelfen, wurden die anderen Schaltungen der Maschinen eingeführt.

2) Nebenschlussmaschinen.

Entsprechend der früher beschriebenen, bei diesen Maschinen eintretenden Stromverzweigung bezeichnen wir den Widerstand des Ankers mit a , den Widerstand der Windungen der Elektromagnete mit n , die entsprechenden Stromstärken mit J_a und J_n für die äussere Leitung wie zuvor mit J .

Dann sind die Hauptgleichungen dieser Anordnung:

$$J_a = J_n + J, \quad (19)$$

$$n J_n = u J = P, \quad (20)$$

$$E = a J_a + n J_n = \frac{fv\mu m J_n}{1 + \mu m J_n}. \quad (21)$$

Es ist zweckmässig, die einzelnen Grössen durch die Polspannung P auszudrücken. Für dieselbe findet man:

$$\begin{aligned} P &= \frac{fvnu}{an + au + un} - \frac{n}{\mu m}, \\ &= \frac{fvw}{a + w} - \frac{n}{\mu m}, \end{aligned} \quad (22)$$

wenn:

$$w = \frac{un}{u + n}$$

gesetzt wird.

Ferner ist:

$$J_a = \frac{P}{w}, \quad J_n = \frac{P}{n}, \quad J = \frac{P}{u}, \quad (23)$$

$$E = \frac{P(a+w)}{w}, \quad (24)$$

$$\lambda = \frac{w^2}{u(a+w)}. \quad (25)$$

Für kleine Werthe von u würde P einen negativen Werth besitzen. Dies ist selbstverständlich nicht zulässig. Die Polspannung ist in Wirklichkeit 0 für $u = 0$, bleibt zunächst klein, wächst dann aber und nähert sich für sehr grosse Werthe einem endlichen Grenzwert. Sieht man P als eine Function der Veränderlichen $\frac{vw}{a+w}$ an, so folgt P dem Gesetz einer Geraden, welche die Abscissenaxe vor dem Nullpunkt schneidet. Die Polspannung verändert sich hiernach bei der Nebenschlussmaschine in entgegengesetzter Weise, wie diejenige der Hauptschlussmaschine, wenn man den Widerstand der äusseren Leitung von kleinen zu grossen Werthen übergehen lässt. Da bei der praktischen Anwendung der Maschinen, z. B. zur Erzeugung von elektrischem Licht, häufig grosse Schwankungen des Widerstandes der äusseren Leitung vorkommen, dabei aber grössere Schwankungen der Polspannung sehr nachtheilig sind, so hat man Schaltungen ersonnen, welche als Combination der Anordnungen bei Haupt- und Nebenschlussmaschinen anzusehen sind.

3) Maschinen mit gemischter Wickelung.

Bei denselben besitzen die Elektromagnete zwei verschiedene Wickelungen. Für die erste, die direkte Wickelung, bezeichnen wir die Windungszahl mit m_b . Ihr Widerstand sei b . Die andere, die Nebenwicklung, bestehe aus m_n -Windungen. Ihr Widerstand ist n . Die Stromstärken in denselben seien J_b und J_n . Die magnetisirende Kraft besteht aus der Summe der Wirkungen der beiden Wickelungen. Dieselben werden bei der verschiedenen Lage der Windungen nicht genau gleichartig sein. Es wäre daher zwischen den Werthen der Constanten μ zu unterscheiden. In erster Annäherung wird man dieselben aber als gleich ansehen dürfen. Es ist daher zu setzen:

$$M = \frac{\mu(m_b J_b + m_n J_n)}{1 + \mu(m_b J_b + m_n J_n)}. \quad (26)$$

Bei der Aufstellung der weiteren Gleichungen ist zwischen den beiden Fällen zu unterscheiden, wo die Nebenwicklung parallel zum Anker und wo dieselbe parallel zur äusseren Leitung liegt.

Wir beschränken uns hier auf den ersten Fall. Dann ist der Strom in der direkten Wickelung und in der äusseren Leitung derselbe. Also

$$J_a = J_b.$$

Die weiteren Gleichungen sind dann die folgenden:

$$J_a = J + J_n, \quad (27)$$

$$J(b+u) = nJ_n, \quad (28)$$

$$E = aJ_a + nJ_n = \frac{f \cdot v \cdot \mu (m_b J_b + m_n J_n)}{1 + \mu (m_b J_b + m_n J_n)}. \quad (29)$$

Die Ausdrücke für die Stromstärke in der äusseren Leitung und die Polspannung sind:

$$J = \frac{A}{u+\alpha} - \frac{B}{u+\beta}, \quad P = \frac{Au}{u+\alpha} - \frac{Bu}{u+\beta}. \quad (30)$$

Hierin ist gesetzt:

$$A = \frac{f v n}{a + n}, \quad B = \frac{n}{\mu m_n}, \quad (31)$$

$$\alpha = \frac{ab + an + nb}{a + n}, \quad \beta = b + n \frac{m_b}{m_n}. \quad (32)$$

Der Ausdruck für die Polspannung zeigt, dass dieselbe für $u = 0$ Null ist und für $u = \infty$ den Grenzwert $A - B$ annimmt. Jedoch kann dieselbe dazwischen ein Maximum besitzen. Dies ist der Fall, wenn die Gleichung:

$$\frac{dP}{du} = 0.$$

oder:

$$(A\alpha - B\beta)u^2 + 2u\alpha\beta(A - B) + \alpha\beta(A\beta - B\alpha) = 0$$

eine positive Wurzel für u liefert. Dann muss:

$$A\alpha < B\beta$$

sein. Ist dies der Fall, so nähert sich die Maschine in ihrem Verhalten demjenigen der Maschine mit direkter Wickelung. Ist umgekehrt:

$$A\alpha > B\beta,$$

so verhält sich dieselbe ähnlich wie eine Nebenschlussmaschine. Ist endlich:

$$A\alpha = B\beta,$$

so vollzieht sich die Annäherung an den Grenzwert $A - B$ bei wachsendem u sehr langsam. Die Aenderungen für grössere Werthe von u sind nur gering. Man kann dann die Maschine als Maschine mit constanter Polspannung bezeichnen.

Die hier entwickelte Theorie der Gleichstrommaschinen von O. FRÖLICH¹⁾ hat nur Gültigkeit für den Bereich einer im Gang befindlichen Maschine, bei welchem Stromstärke und Magnetismus gewisse, mittlere Werthe besitzen, welche allerdings gerade diejenigen sind, die bei dem praktischen Betrieb der Maschinen in Betracht kommen. Eine umfassendere Theorie hat R. CLAUDIUS²⁾ gegeben.

Bei derselben wird noch Rücksicht genommen auf die Induction, welche von Seiten des Ankerrings, dessen Magnetismus man sich im Raum als unbeweglich denken kann, auf die rotirende Wickelung ausübt. Bei der Berechnung des Stromes findet CLAUDIUS für die elektromotorische Kraft einen Ausdruck:

$$E = i \cdot F(i, v),$$

wobei dieselbe nicht mehr der Tourenzahl proportional ist. Die früher erwähnten Versuche von O. E. MEYER und F. AUERBACH werden durch diese Theorie besser dargestellt, als durch die Formeln von FRÖLICH. Dagegen scheint es, dass die FRÖLICH'sche Theorie gerade dann vollständig ausreicht, wenn — wie bei den neueren Gleichstrommaschinen — die Elektromagnete aus grossen Eisenmassen bestehen und dafür der Anker mit verhältnissmässig wenig Windungen versehen ist³⁾.

E. Wechselstrommaschinen.

Während in dem ersten Entwicklungsstadium der dynamoelektrischen Maschinen die Gleichstrommaschinen bevorzugt und fast ausschliesslich in der Praxis angewandt wurden, stellte sich nach und nach heraus, dass die Wechsel-

1) O. FRÖLICH, Elektrotechn. Zeitschr. 2, pag. 134, 170. 1881; 3, pag. 69, 113. 1882.

2) R. CLAUDIUS, WIED. Ann. 20, pag. 353, 390. 1883. — Elektrotechn. Zeitschr. 5, pag. 119, 153, 304. 1884; 6, pag. 414, 515. 1885.

3) Vergl. W. KOHLRAUSCH, Centralblatt f. Elektrotechnik 1887, pag. 411. — O. FRÖLICH, Elektrotechn. Zeitschr. 8, pag. 161 u. 217. 1887.

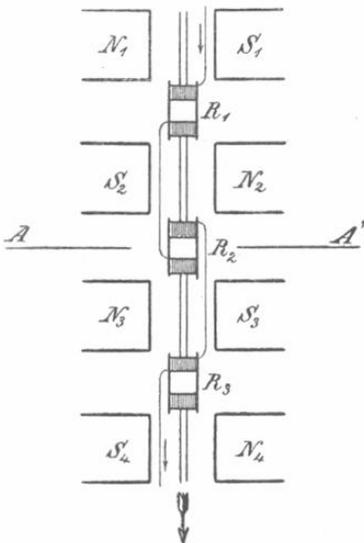
strommaschinen bei manchen Anwendungen wichtige Vorzüge vor den Gleichstrommaschinen besitzen. Dem entsprechend wurden dieselben soweit vervollkommen, dass schon jetzt bei der Anlage der Centralen der Betrieb derselben mit Wechselströmen in Concurrenz tritt mit dem Gleichstrombetrieb. Im Princip ist die Wechselstrommaschine einfacher als die Gleichstrommaschine. Jede magnetelektrische Maschine wirkt als Wechselstrommaschine, wenn der Commutator fortgelassen wird und die Enden der Inductionsrolle mit zwei isolirten, auf der Axe sitzenden Ringen verbunden werden, auf welchen zwei Federn oder Bürsten schleifen. In ähnlicher Weise kann jede dynamoelektrische Maschine bei Unterdrückung des Collectors als Wechselstrommaschine benutzt werden. Allerdings müssen in diesem Fall die Elektromagnete durch einen besonderen, stets gleichgerichteten Strom erregt werden. Man kann indess auch die Anordnung treffen, dass die von der Maschine selbst erzeugten Wechselströme durch einen besonderen Commutator durch die Elektromagnetentwickelungen stets gleich gerichtet fließen (selbsterregende Wechselstrommaschinen).

Die Wechselstrommaschinen sind gewöhnlich multipolar, so dass bei einer ganzen Umdrehung des Ankers in jeder Spule eine grössere Anzahl von Wechsellern der elektromotorischen Kraft erfolgt.

Je nach der Construction des Ankers kann man unterscheiden:

Wechselstrommaschinen mit Scheibenarmatur, mit Trommelarmatur, mit Ringarmatur.

Bei der ersten Klasse sitzen die Inductionsrollen R_1, R_2, R_3 etc. kranzförmig auf einer Scheibe, welche



(P. 293.)

um eine Axe AA' (Fig. 293) rotirt. Bei dem Uebergang von R_1 aus dem Magnetfeld N_1S_1 in das Feld N_2S_2 wird ein Strom inducirt, dessen elektromotorische Kraft bei dem Durchgang durch N_2S_2 auf Null sinkt und hiernach ein Maximum von entgegengesetztem Vorzeichen erreicht. Sind die einzelnen Spulen so mit einander verbunden, dass ihre elektromotorischen Kräfte in der ganzen Reihe gleiche Richtung haben, so addiren sie sich. Die gesammte elektromotorische Kraft ist dann der Spulenzahl proportional.

Wechselstrommaschinen mit Ringarmatur brauchen wir nicht näher zu besprechen. Dieselben sind ähnlich construirt, wie die entsprechenden Gleichstrommaschinen. Doch treten an Stelle des Collectors Ringe mit Schleiffedern.

Für die Wechselstrommaschinen mit Trommelanker wollen wir die Construction von SIEMENS und HALSKE als Beispiel nehmen. Bei derselben sitzen die Armaturspulen auf der Innenseite eines festen Holzrades und sind auf Holzkerne gewickelt. Die Elektromagnete sind dagegen radial im Innern auf der Axe befestigt und rotiren mit derselben.

Die Wechselstrommaschinen gestatten in Folge ihrer einfacheren Construction die Erzeugung von Strömen sehr hoher Spannung. Da der Collector fehlt, so ist eine Zerstörung desselben durch Funken nicht zu befürchten. Besonders vorthelhaft ist in dieser Beziehung die zuletzt erwähnte ruhende Trommelarmatur, bei

welcher die Wechselströme durch einfache Klemmen in die äussere Leitung geführt werden können. Ein weiterer Vorzug der Wechselströme liegt ferner darin, dass dieselben durch Vorrichtungen einfacher Art (Transformatoren), welche noch besprochen werden sollen, aus Strömen hoher Spannung in Ströme niedriger Spannung und umgekehrt verwandelt werden können.

Dagegen sind die Gleichströme den Wechselströmen dadurch überlegen, dass sie sich besser zur Erzeugung von Licht, besonders bei Benutzung von Bogenlampen eignen und dass die Anwendung von Wechselströmen zum Betrieb von Motoren bisher Schwierigkeiten bereitete, welche erst in neuester Zeit überwunden zu sein scheinen.

Für die Berechnung des Verlaufes von Wechselströmen können wir auf frühere Entwicklungen¹⁾ verweisen. Die elektromotorischen Kräfte der Wechselstrommaschinen lassen sich annähernd durch eine Sinusfunction der Zeit wiedergeben. Dann wird auch die Stromstärke durch eine gleiche Function dargestellt. Doch ist die Phase der Schwingung bei derselben gegen die elektromotorische Kraft in Folge der Selbstinduction verzögert. Hierbei wurde allerdings vorausgesetzt, dass der Selbstinductionscoëfficient des Stromkreises constant ist. Dies ist nicht mehr der Fall, wenn derselbe Rollen mit starken Eisenkernen enthält, da der, durch die Wechselströme erzeugte Magnetismus nicht mehr in jedem Augenblick der Stromstärke proportional ist. In diesem Fall treten bei den Wechselströmen Abweichungen von dem einfachen Sinusgesetz ein, deren Berechnung sich nicht allgemein durchführen lässt.

F. Transformatoren.

1) Wechselstromtransformatoren. Secundärgeneratoren.

Handelt es sich um Leitungen mit grossem Widerstand, durch welche die Ströme von Maschinen hindurchgehen müssen, um die ihnen obliegenden Functionen zu erfüllen, so ist es nothwendig, denselben eine hohe Spannung zu geben. Umgekehrt dürfen die Ströme, welche etwa zur Beleuchtung dienen oder Motoren treiben sollen, gewöhnlich nur eine mässige Spannung besitzen. Die Erhöhung oder Herabsetzung der Spannung wird durch eine besondere Klasse von Apparaten bewirkt, welche man als Transformatoren bezeichnet.

Handelt es sich um Wechselströme, so sind dieselben nach dem Princip der gewöhnlichen Inductionsapparate construirt, bestehen also aus einem Eisenkern, mit zwei Wickelungen, deren Windungszahlen verschieden sind.

Bei den in den physikalischen Laboratorien gebräuchlichen Funkeninductoren von cylindrischer Form tritt ein bedeutender Verlust durch Streuung der magnetischen Kraftlinien ein. Die in der Technik angewandten Transformatoren haben daher eine etwas andere Form. Man unterscheidet: Kerntransformatoren und Manteltransformatoren.

Erstere bestehen aus einem Eisenring, welcher aus dünnen Drähten gebildet, und mit den primären und secundären Windungen entweder gleichmässig oder derart bedeckt ist, dass in gleichen Intervallen auf dem Ring Lagen von primären und secundären Wickelungen abwechseln.

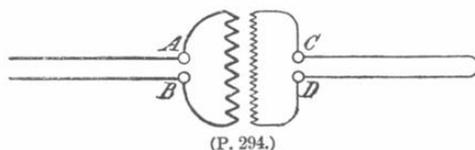
Bei den Manteltransformatoren werden zwei eng aneinandergrenzende Ringe von den primären und secundären Wickelungen gebildet, welche vollständig in Eisenmassen eingeschlossen, also etwa mit Eisendrähten umwickelt sind.

¹⁾ Handbuch 3 (2), pag. 387—392.

Eine dem gewöhnlichen Inductionsapparat sich mehr anschliessende Form hat der Igeltransformator von SWINBURNE¹⁾.

Die beiden Wickelungen sind immer in der Weise verschieden, dass die eine aus dünneren Drähten in erheblich grösserer Windungszahl, die andere aus dicken Drähten von geringerer Windungszahl besteht.

Die Wirkungsweise der Transformatoren ergibt sich aus den folgenden



Betrachtungen, wobei wir zunächst annehmen, dass der Magnetismus des Eisens der Einwirkung der magnetisirenden Kraft ohne Hysteresis und ohne Wirbelströme folgt²⁾.

Die Klemmspannung des primären Wechselstromes in AB (Fig. 294) sei E_1 , der Widerstand der primären Wickelung w_1 , ihr Selbstinductionscoefficient p_1 . Für den secundären Stromkreis sei w_2 der Gesamtwiderstand, p_2 der Coefficient der Selbstinduction. Endlich sei q der Coefficient der Induction der primären auf die secundären Windungen mit Einschluss der Mitwirkung der Eisenmassen.

Dann gelten die früher³⁾ aufgestellten Gleichungen:

$$w_1 J_1 + p_1 \frac{dJ_1}{dt} + q \frac{dJ_2}{dt} = E_1,$$

$$w_2 J_2 + p_2 \frac{dJ_2}{dt} + q \frac{dJ_1}{dt} = 0.$$

Der Widerstand w_2 besteht aus dem Widerstand der secundären Windungen: r und demjenigen der äusseren Leitung l . Also ist:

$$w_2 = r + l.$$

Die secundäre Polspannung (Potentialdifferenz der Punkte CD) ist dann:

$$E_2 = l \cdot J_2.$$

Sind e_1 und e_2 die Amplituden von E_1 und E_2 , ist ferner:

$$m = \frac{2\pi}{T},$$

so kann man setzen:

$$E_1 = e_1 \cos(mt),$$

$$E_2 = e_2 \cos(mt - \varphi_2).$$

Man bezeichnet das Verhältniss $\frac{e_2}{e_1}$ als den Umsetzungscoefficienten des Transformators. Mit Benutzung der früheren Rechnungen erhält man abgesehen vom Vorzeichen):

$$\frac{e_2}{e_1} = \frac{lA_2}{e_1} = \frac{lmq}{\sqrt{\rho_1^2 + m^2 p_1^2} \sqrt{(l+r)^2 + m^2 p_2^2}}.$$

Fasst man den Fall ins Auge, dass eine Transformation von kleiner zu grosser Spannung stattfindet und dass l gross ist, so ist annähernd:

$$\frac{e_2}{e_1} = \frac{mq}{\sqrt{\rho_1^2 + m^2 p_1^2}}.$$

Ist ferner ρ_1 klein, so ist:

$$\frac{e_2}{e_1} = \frac{q}{p_1}.$$

1) SWINBURNE, Elektrotechn. Zeitschr. II, pag. 65, 515, 575. 1890.

2) Vergl. Handbuch 3 (2), pag. 411.

3) Handbuch 3 (2), pag. 394.

Nach früheren Entwicklungen¹⁾ ist, wenn n_1 und n_2 die Anzahl der Windungen der primären und secundären Wicklung:

$$q = kn_1n_2, \quad \phi_1 = kn_1^2, \quad \phi_2 = kn_2^2.$$

Also:

$$\frac{e_2}{e_1} = \frac{n_2}{n_1}.$$

In erster Annäherung verhalten sich also die Polspannungen, wie die Windungszahlen der Wicklungen.

Bezeichnet man ferner mit η_1 den Mittelwerth der Energie des eintretenden Stromes. Ist also:

$$\eta_1 = \frac{1}{T} \int_0^T J_1 E_1 dt,$$

mit η_2 den Nutzeffekt oder den Mittelwerth der Energie des austretenden Stromes, also:

$$\eta_2 = \frac{1}{T} \int_0^T J_2 E_2 dt,$$

so ist der absolute Wirkungsgrad des Transformators:

$$\gamma = \frac{\eta_2}{\eta_1}.$$

Die Rechnung giebt aus den beiden Differentialgleichungen:

$$\eta_1 = \frac{w_1}{T} \int_0^T J_1^2 dt + \frac{w_2}{T} \int_0^T J_2^2 dt,$$

$$\eta_2 = \frac{l}{T} \int_0^T J_2^2 dt.$$

Nach früheren Rechnungen²⁾ ist:

$$\eta_1 = \frac{w_1 A_1^2}{2} + \frac{w_2 A_2^2}{2}$$

$$\eta_2 = \frac{l A_2^2}{2}$$

$$\gamma = \frac{l}{l + r + \frac{w_1(w_2^2 + m^2 \phi_2^2)}{m^2 q^2}}.$$

Für grössere Werthe von l und mq liegt dieser Werth der Einheit nahe. Wir haben bei diesen Berechnungen mehrere Nebenumstände ausser Acht gelassen, besonders die Hysteresis und die Wirbelströme im Eisenkern oder in der Eisenumhüllung, welche einen etwas grösseren Energieverlust bedingen.

Man kann dieselben in der Weise berücksichtigen, dass man noch einen dritten Stromkreis bei der Berechnung hinzunimmt, welcher durch Induction mit dem ersten und zweiten Stromkreis in Wechselwirkung steht³⁾.

¹⁾ Handbuch 3 (2), pag. 374. Hier ist von der Voraussetzung ausgegangen, dass der Eisenkern einen Kreisring bildet.

²⁾ Handbuch 3 (2), pag. 345.

³⁾ FERRARIS, Mem. R. Acc. di Science, Torino (2) 37, pag. 15. 1885. — Vergl. auch über die Theorie der Transformatoren. H. DU BOIS, Magnetische Kreise, deren Theorie und Anwendung. Berlin 1894, pag. 294–306.

2. Gleichstromtransformatoren und Gleichstrom-Wechselstromtransformatoren.

Um Gleichströme hoher Spannung in Gleichströme niedriger Spannung zu transformiren und umgekehrt, bedient man sich zweier Gleichstrommaschinen, deren Anker eine gemeinsame Drehungsaxe haben. Wird in die eine Maschine ein constanter Strom hineingeleitet, so rotirt dieselbe. Der Anker der anderen Maschine nimmt an dieser Rotation theil. Es wird in derselben ein Gleichstrom inducirt, welchen man von den Polklemmen entnehmen kann. Besitzt der erste Anker eine kleine Anzahl von Windungen eines dicken Drahts, der zweite eine Wickelung von vielen dünnen Windungen, so ist die in der zweiten Maschine inducirte, elektromotorische Kraft bei sonst gleichen Umständen grösser als diejenige der ersten Maschine. Man erhält also eine höhere Klemmspannung bei einem grösseren Ankerwiderstand. Demnach ist ein niedrig gespannter Strom in höher gespannten Strom verwandelt.

Noch einfacher lässt sich dies bewerkstelligen, wenn man den Anker einer Maschine mit zwei Wickelungen versieht, von denen die eine aus dickem Draht und wenigen Windungen, die andere aus dünnem Draht mit vielen Windungen besteht. Jede Wickelung steht mit einem besonderen Collector in Verbindung. Wird in das eine Bürstenpaar ein niedrig gespannter, starker Strom eingeleitet, so erhält man an dem anderen Bürstenpaar eine höhere Spannung.

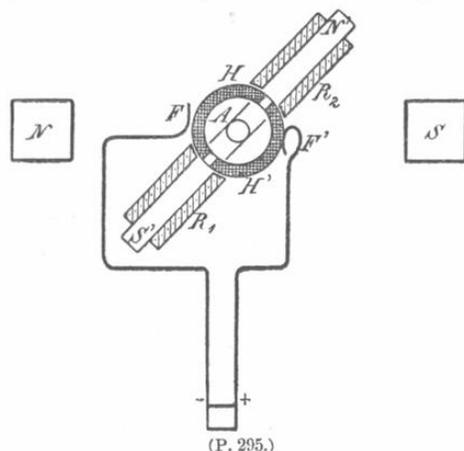
Haben eine Gleichstrommaschine und eine Wechselstrommaschine dieselbe Axe, so kann man in die erste Gleichstrom einleiten; von der zweiten Wechselstrom entnehmen oder umgekehrt. Man kann dies als eine Transformation von Gleichstrom in Wechselstrom bezeichnen.

Selbstverständlich stehen diese Transformatoren den früher beschriebenen Wechselstromtransformatoren in der Sicherheit des Betriebes nach.

G. Elektromagnetische Motoren. Historisches.

In Folge der Entdeckung des Elektromagnetismus war die Möglichkeit gegeben, Anziehungs- und Abstossungskräfte hervorzubringen, welche vor den Wechselwirkungen der Stahlmagnete wichtige Vorzüge besitzen. Zunächst übertreffen sie letztere bei geeigneter Anordnung erheblich an Stärke. Ferner können die elektromagnetischen Kräfte in jedem Augenblick durch Stromschluss erzeugt, durch Oeffnung vernichtet, durch Stromwendung umgekehrt werden.

Hiernach lag es nahe, dieselben zum Betrieb von Motoren zu verwenden. Dabei wurden verschiedene Constructionsprincipien angewandt, von denen wir hier eine kurze Uebersicht geben.



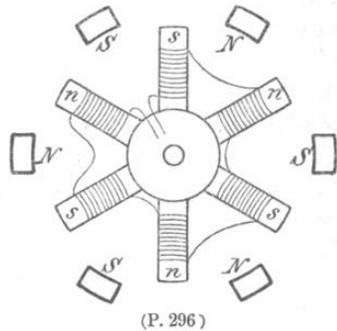
Es seien (Fig. 295) N und S die Pole eines feststehenden Stahlmagnets. Zwischen denselben ist ein Eisenkern $N'S'$ um eine vertikale Axe A drehbar. Derselbe trägt zwei Rollen R_1 und R_2 , durch welche ein elektrischer Strom geleitet wird. Die Richtung desselben sei derart, dass in dem betreffenden Augenblick die Pole N' und S' erzeugt werden. Dann erhält der Kern durch

Anziehung der benachbarten Pole N auf S' und S auf N' einen Bewegungsantrieb und dreht sich im Sinne des Uhrzeigers. Sobald der Eisenkern die Linie NS passirt, muss der Strom unterbrochen und dann in entgegengesetzter Richtung durch die Rollen geleitet werden. Unterbrechung und Umkehr wird durch eine, an der Axe angebrachte Vorrichtung bewirkt, welche aus zwei von einander isolirten Halbringen (H und H') besteht, auf welchen feste Federn F, F' schleifen, welche mit den Polen der Kette in Verbindung stehen. Bei der neuen Stromrichtung finden Abstossungen von S auf S' und N auf N' statt, welche bewirken, dass die Rotation im gleichen Sinne fortschreitet.

Man kann diese Anordnung in verschiedenster Weise modificiren.

1) Die feststehenden Magnete können Elektromagnete sein, während zwischen denselben ein Stahlmagnet rotirt. Ebenso können beide Magnetsysteme Elektromagnete sein. Die Stromumkehr darf dann selbstverständlich nur bei dem einen Elektromagnet stattfinden.

2) Die Wirkung wird erheblich verstärkt, wenn an Stelle der beiden Pole N und S eine Reihe von abwechselnden Polen N_1, S_1, N_2, S_2 etc. auf einem Kreise angebracht sind, während das bewegliche System aus einer gleichgrossen Anzahl von Magneten besteht (Fig. 296). Die Umkehrung des Stromes muss dann bei einer Umdrehung ebenso oft erfolgen, als bewegliche oder feste Magnetpole vorhanden sind.



3) Anstatt der Rotation um eine vertikale Axe kann dieselbe um eine horizontale Axe sich vollziehen.

4) Endlich kann die Anordnung getroffen sein, dass die beiden Pole der feststehenden und der beweglichen Magnete bei der Drehung anziehend, resp. abstossend mitwirken.

Maschinen dieser Art wurden construirt von DAL NEGRO, RITCHIE, JAKOBI¹⁾, GRÜEL²⁾ und Anderen.

Bei einer anderen Form elektromagnetischer Motoren benutzt man die Eigenschaft einer Spirale, einen weichen Eisenkern, dessen Axe mit derjenigen der Spirale zusammenfällt, in ihr Inneres hineinzuziehen, wenn durch die Spirale ein Strom geschickt wird.

Durch Anwendung zweier Spiralen, durch welche man abwechselnd einen Strom sendet, kann der Eisenkern in eine hin- und hergehende Bewegung zwischen den beiden Rollen versetzt werden, durch welche man, wie bei der Bewegung des Kolbens einer Dampfmaschine, eine rotirende Bewegung hervorbringen kann.

Nach diesem Princip wurden Motoren von PAGE, FESSEL³⁾ und Anderen construirt.

Die meisten dieser Apparate dienten nur zur Demonstration. Nur M. H. JAKOBI⁴⁾ benutzte die von ihm construirte, elektromagnetische Maschine zum Be-

1) M. H. JAKOBI, POGG. Ann. 36, pag. 366. 1835.

2) POGG. Ann. 89, pag. 153. 1853.

3) PLÜGKER, Ueber den FESSEL'schen elektromagnetischen Motor; POGG. Ann. 83, pag. 463. 1851.

4) POGG. Ann. 36, pag. 366. — Mémoire sur l'application de l'électromagnétisme au mouvement des machines. Potsdam 1835.

trieb eines Bootes. Dieselbe wurde durch eine Batterie von 64 GROVE'schen Elementen in Bewegung gesetzt. Im Jahre 1839 fuhr ein derartiges Boot mit 12 Personen in Petersburg mehrmals über die Newa.

Indess lehrte dieser Versuch, dass der Grossbetrieb von Maschinen durch den elektrischen Strom einer galvanischen Kette viel theurer war, als bei Anwendung einer Dampfmaschine, so dass mehrere Jahrzehnte in dieser Beziehung keine erheblichen Fortschritte gemacht wurden.

H. Elektrische Kraftübertragung.

Erst nach der Erfindung der dynamoelektrischen Maschinen wurde der Gedanke wieder aufgenommen, elektromagnetische Motoren zum Betrieb anderweitiger Maschinen zu verwenden. Die Bedingungen für eine schnelle Entwicklung dieses Zweiges der Elektrotechnik lagen jetzt aus den folgenden Gründen ungleich günstiger wie zuvor.

1) Jede Gleichstrommaschine kann ohne weiteres als elektromagnetischer Motor verwandt werden, wenn man derselben durch die Polklemmen einen constanten Strom zuleitet. Derselbe durchläuft zunächst die Windungen der Elektromagnete und erzeugt dadurch ein starkes Magnetfeld. Ferner geht er durch die Ankerwindungen und zwar durch jede Hälfte derselben in dem Sinne, dass der ganze Anker einen Bewegungsantrieb in gleicher Richtung erhält. Derselbe ist fast vollständig constant. Die Gleichstrommaschinen sind daher viel vollkommenere Motoren als die früher construirten, elektromagnetischen Maschinen, bei denen die Triebkraft erheblichen Schwankungen (Pulsationen) unterworfen ist.

2) Nach dem dynamoelektrischen Princip wird durch Aufwand von Arbeit der elektrische Strom viel billiger erzeugt als durch die chemische Wirkung constanter Ketten.

3) Da diesem Strom unter geeigneten Umständen leicht eine viel grössere Spannung ertheilt werden kann, so ist es möglich, grosse Widerstände einzuschalten oder starke elektromotorische Kräfte entgegenzusetzen, ohne seine Intensität zu sehr zu schwächen. Man kann daher den dynamoelektrischen Strom neben anderen Zwecken auch dazu benutzen, elektromagnetische Motoren zu treiben und dadurch wieder Arbeit zu leisten.

Eine solche, von der Technik mit grossem Erfolg benutzte Anordnung, bei welcher an einem Ort durch Aufwand von Arbeit elektrischer Strom erzeugt, an einem anderen Ort durch denselben Strom Arbeit geleistet wird, bezeichnet man als elektrische Kraftübertragung. Je nach dem Zweck, den man dabei im Auge hat, wollen wir zwei Hauptfälle der Kraftübertragung unterscheiden.

1) An einem bestimmten Ort sei durch die lokalen Verhältnisse Arbeitskraft leicht und billig zu erhalten, also etwa durch Ausnutzung eines Wasserfalls oder eines Flusses mit starkem Gefälle oder durch Benutzung einer Dampfmaschine, welche an einem Ort aufgestellt ist, wohin die Kohlen leicht und billig transportirt werden können. Die zu leistende Arbeit wird aber an einem anderen, mehr oder weniger entfernten Ort gebraucht. Dann wird an dem ersten Ort eine Maschine aufgestellt, welche den Strom erzeugt (der Generator), der Strom wird an den anderen Ort geleitet und es wird dort durch eine zweite Maschine (den Motor oder den Receptor) Arbeit geleistet. Diese einfache Kraftübertragung hat bei kleinen Entfernungen keine Schwierigkeit. Bei grossen Entfernungen war anfänglich der Nutzeffekt nur gering. Doch sind in dieser Beziehung in den letzten Jahren bereits überraschende Fortschritte gemacht worden.

2) Die Erzeugung elektrischer Ströme durch Arbeit gestaltet sich dann besonders günstig, wenn es sich um grosse Arbeitsmengen und starke Ströme handelt. Dieselben reichen hin, um an einer ganzen Reihe von Orten durch Benutzung kleinerer Motoren Arbeit in geringerer Menge zu leisten. Man bezeichnet diese Form der Kraftübertragung als Kraftvertheilung.

Zu dem Zweck werden an einer Stelle (der Centrale) mehrere dynamo-elektrische Maschinen, gewöhnlich von grossen Dimensionen, aufgestellt, von denen Leitungen ausgehen, die sich nach allen den Orten verzweigen, wo elektrischer Strom zur Arbeitserzeugung (oder zu anderen Zwecken, wie zur Beleuchtung) gebraucht wird. Derartige Centralen sind bereits in vielen Städten errichtet worden und nimmt ihre Anzahl fortdauernd zu.

Besondere Anordnungen sind dabei zu treffen, wenn die Motoren nicht feststehen, sondern in Folge der Kraftübertragung ihren Ort verändern, wie dies bei den elektrischen Bahnen der Fall ist.

Indem wir dazu übergehen, von den Gesetzen und Einrichtungen der Kraftübertragung eine kurze Uebersicht zugeben, verweisen wir zunächst auf eine Reihe von Schriften, welche diesen Gegenstand ausführlicher behandeln.

E. JAPING, Die elektrische Kraftübertragung und ihre Anwendung in der Praxis. Dritte Auflage, neu bearbeitet von J. ZACHARIAS. A. HARTLEBEN'S elektrotechnische Bibliothek 2. 1891.

E. DE FODOR, Die elektrischen Motoren mit besonderer Berücksichtigung der elektrischen Strassenbahnen. A. HARTLEBEN'S elektrotechnische Bibliothek 41. 1890.

GISBERT KAPP, Elektrische Kraftübertragung. Ein Lehrbuch für Elektrotechniker, deutsch v. L. HOLBORN und K. KAHLE. 1891.

J. Nutzeffekt und Wirkungsgrad der Kraftübertragung.

Um einen Inductionsstrom durch Bewegung eines Leiters in einem magnetischen Kraftfeld zu erzeugen, ist eine gewisse Arbeit erforderlich. Nach dem Grundgesetze F. NEUMANN'S ist dieselbe der hervorgebrachten, elektromotorischen Kraft proportional oder auch bei passender Wahl der Einheiten gleich, wenn der Leiter von der Stromeinheit durchflossen wird. Folglich ist die ganze aufzuwendende Arbeit A bei der Stromstärke J :

$$A = E \cdot J.$$

Hierbei ist allerdings von der Ueberwindung der Reibung bei der Drehung der Maschine, sowie von anderen Nebenwirkungen abgesehen.

Die gleiche Formel gilt auch für eine als Motor durch den Strom in Bewegung gesetzte Maschine, wenn wir dieselben vereinfachenden Voraussetzungen erreichen, wie zuvor.

Bezeichnen wir die auf den Generator sich beziehenden Grössen mit dem Index 1, die auf den Motor bezüglichen mit dem Index 2, so ist die Arbeit bei dem Generator:

$$A_1 = E_1 J_1,$$

die nutzbare Arbeit des Motors (der Nutzeffekt):

$$A_2 = E_2 J_2.$$

Das Verhältniss beider Arbeitsgrössen (λ) ist der elektrische Wirkungsgrad der Kraftübertragung. Also:

$$\lambda = \frac{A_2}{A_1}.$$

Nehmen wir zunächst an, dass beide Maschinen Hauptschlussmaschinen sind, so ist die Stromstärke im Anker des Generators dieselbe wie in den leitenden Verbindungsdrähten und in dem Anker des Motors. Der Widerstand des ganzen Stromkreises sei W , die Stromstärke:

$$J = J_1 = J_2.$$

Dann ist¹⁾:

$$A_1 = E_1 J = W J^2 + A_2 \quad (1)$$

$$E_1 J = W J^2 + E_2 J.$$

$$J = \frac{E_1 - E_2}{W} \quad (2)$$

Also:

$$A_1 = \frac{E_1(E_1 - E_2)}{W} \quad (3)$$

$$A_2 = \frac{E_2(E_1 - E_2)}{W} \quad (4)$$

$$\lambda = \frac{E_2}{E_1}. \quad (5)$$

Wir machen von diesen Gleichungen einige naheliegende Anwendungen.

a) Aus Gleichung (4) ergibt sich das Maximum des Nutzeffekts durch die Formel:

$$\frac{dA_2}{dE_2} = 0.$$

Man findet für diesen Fall:

$$E_2 = \frac{E_1}{2}, \quad A_2 = \frac{E_1^2}{4W}, \quad \lambda = \frac{1}{2}.$$

b) Zu demselben Resultat kann man auch auf die folgende Weise gelangen. Aus Gleichung (1) ergibt sich:

$$J_1 = \frac{E_1 + \sqrt{E_1^2 - 4WA_2}}{2W}.$$

Ferner aus (2):

$$E_2 = \frac{E_1 - \sqrt{E_1^2 - 4WA_2}}{2}.$$

Da J stets reell sein muss, so ist das Maximum des Nutzeffekts:

$$A_2 = \frac{E_1^2}{4W}.$$

Dementsprechend:

$$J = \frac{E_1}{2W}, \quad E_2 = \frac{E_1}{2}, \quad \lambda = \frac{1}{2}.$$

c) Setzt man in Gleichung (4) nach Gleichung (5)

$$E_2 = \lambda E,$$

so ist:

$$A_2 = \frac{E_1^2}{W} \lambda(1 - \lambda).$$

Diese Gleichung ist von Wichtigkeit für die Berechnung von Kraftübertragung bei längeren Leitungen. Sie zeigt, dass man denselben Nutzeffekt bei gleichem Wirkungsgrad erhält, wenn man bewirkt, dass: $\frac{E_1^2}{W}$ constant bleibt. Mit anderen Worten: wenn in Folge der Länge der Leitung W wächst, so hat man entweder den Querschnitt des Leiters derart zu vergrößern, dass W constant bleibt,

¹⁾ Vergl. auch Handbuch 3 (2), pag. 366.

oder, da dies bei weiten Strecken ausserordentlich grosse Kosten für die Herstellung der Leitung erfordern würde, die elektromotorische Kraft des Generators in dem Maasse zu vergrössern, dass der angeführte Ausdruck den gleichen Werth behält.

In der Praxis kommt zu der elektrischen Arbeit des Motors diejenige Arbeit hinzu, welche zur Ueberwindung der Reibungswiderstände desselben dient — die Leerlaufarbeit. Durch Mitberücksichtigung derselben erfahren die angegebenen Rechnungen Modifikationen, für welche wir auf die früher angeführten Specialwerke verweisen.

K. Gleichstrommotoren und Wechselstrommotoren.

1) Wie schon früher bemerkt, kann jede Gleichstrommaschine auch als Gleichstrommotor benutzt werden. Doch sind die Anforderungen, welche man an die Maschine in dem einen und anderen Fall stellt, etwas verschieden, so dass die Construction der Generatoren und Motoren in einer Reihe von Einzelheiten verschieden sein wird. Dabei kommt Folgendes in Betracht. Bei dem Generator ist es vortheilhaft, die Feldmagnete aus Eisenmassen von bedeutenden Dimensionen zu bilden, damit das von ihnen gebildete Magnetfeld stark ist, und möglichst wenig durch den Magnetismus des Ankers gestört wird. Bei den Motoren spielt das Gewicht derselben eine wesentliche Rolle. Dasselbe darf nicht zu gross sein, wenn der Motor leicht transportabel sein soll. Man wird daher in der Vergrösserung der Elektromagnete nicht so weit bei den Motoren gehen dürfen, wie bei den Generatoren.

Ferner wird der Generator durch eine gleichmässig wirkende Kraft längere Zeit in Betrieb erhalten. Dagegen wird der Motor häufig auf kurze Zeit ein geschaltet und ausgeschaltet werden und Arbeit von verschiedener Grösse zu leisten haben. Man wird aber die Forderung stellen, dass er sich stets mit derselben Geschwindigkeit bewegt. Um dies zu erreichen, sind verschiedene Regulierungsmethoden in Gebrauch, auf welche wir hier nicht näher eingehen können. Wird durch die Maschine constante Klemmspannung erhalten, so ist es zweckmässig, den Motor mit Nebenschluss oder mit gemischter Wickelung einzurichten.

2) Sendet man durch die Armaturspulen einer Wechselstrommaschine, bei welcher die Feldmagnete durch eine andere Stromquelle constant magnetisch erhalten werden, Wechselströme, so wird sich der Anker nicht von selbst in Bewegung setzen, weil anziehende und abstossende Wirkungen schnell auf einander folgen und sich daher aufheben. Ist derselbe aber in Rotation versetzt und ist die Geschwindigkeit desselben derart, dass eine Ankerspule in derselben Zeit an Stelle der vorangehenden getreten ist, in welcher ein Stromwechsel stattfindet, so üben jetzt die Feldmagnete eine Triebkraft aus, welche die Bewegung in Gang erhält. Mit anderen Worten, eine Wechselstrommaschine kann nur dann als Motor dienen, wenn ihr Gang synchron mit demjenigen des Wechselstromgenerators ist. Man hat deshalb Wechselstrommotoren mit einem kleinen Gleichstrommotor verbunden, welcher zunächst bei offenem Stromkreise des Wechselstromes, dem Motor die gleiche Umdrehungsgeschwindigkeit mit der Maschine erteilt. Dann erst wird der Wechselstrom in den Motor eingeführt und liefert nun die erforderliche Triebkraft, um die synchrone Drehung zu erhalten. Bei stark wechselnder Belastung kann aber der Synchronismus gestört werden und der Motor kommt dann schnell zum Stillstand. Man hat ferner versucht, Gleichstrommotoren durch Wechselstrom zu betreiben, welchen

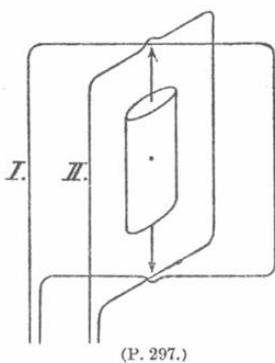
man gleichzeitig durch den Anker und die Feldmagnete leitet. Doch treten dabei sehr starke Funken an dem Collector auf¹⁾.

Ferner hat die Firma GANZ & Co.²⁾ einen Motor construiert, bei welchem durch den Anker und durch die Windungen der Feldmagnete Wechselstrom geschickt wird. Doch wird mit Hilfe eines rotirenden Commutators bewirkt, das der Strom die Elektromagnete stets in derselben Richtung durchläuft. Durch eine besondere Vorrichtung wird die Funkenbildung an dem Commutator vermieden. Dieser Motor geht leicht an und steigert seine Geschwindigkeit, bis er mit dem Generator synchron läuft. Immerhin stehen die beschriebenen Wechselstrommotoren an Einfachheit und Sicherheit des Betriebes den Gleichstrommotoren nach. Es ist daher für die Ausdehnung und Entwicklung der elektrischen Kraftübertragung von grosser Bedeutung, dass in neuester Zeit ein Motor construiert wurde, welcher zwar auch durch Wechselstrom betrieben wird, sich aber principiell von den früheren Wechselstrommotoren unterscheidet und den Gleichstrommotoren in jeder Beziehung an Brauchbarkeit gleichsteht. Da derselbe andererseits auch besondere Anordnungen bei dem Generator erfordert, so wollen wir ihn in einem besonderen Abschnitt behandeln.

L. Mehrphasenströme. Drehströme. Drehstrommotor.

Bei diesen Motoren wird der Anker nach einer Methode in Drehung versetzt, deren Grundgedanke von G. FERRARIS³⁾ herrührt.

Zwei verticale Stromkreise (Fig. 297) von quadratischer Form sind so aufgestellt, dass ihre Mittelpunkte zusammenfallen, ihre Ebenen senkrecht zu einander stehen. Wird durch den Kreis I ein Strom geleitet, so ist die elektromagnetische Wirkung im Mittelpunkt senkrecht zur Ebene der Strombahn. Ein Gleiches gilt von dem zweiten Strom. Bei gleichzeitiger Wirkung beider Ströme setzen sich daher die beiden Kräfte zu einer Resultante zusammen, welche bei Gleichheit der Intensität mit den beiden Normalen derselben Winkel von 45° bildet. Ist der eine oder sind beide Ströme von veränderlicher Stärke, so ändert demnach die Resultante der elektromagnetischen Kraft nicht allein ihre Grösse, sondern auch ihre Richtung. Leitet man durch beide Stromkreise Wechselströme von gleicher Schwingungszahl, aber von verschiedener



Phase, so dreht sich die Resultante mit gleichzeitig veränderlicher Stärke um 360° . Stellt man die elektromagnetische Kraft durch eine gerade Linie AB dar, wo A der Angriffspunkt der Kraft ist, so beschreibt Punkt B eine Ellipse. Damit dieselbe zu einem Kreis wird, ist es nothwendig, dass die Amplituden der beiden Stromschwingungen einander gleich sind und dass der Phasenunterschied 90° beträgt. In diesem Fall behält also die elektromagnetische Kraft stets dieselbe Stärke, dreht sich aber mit gleichbleibender Winkelgeschwindigkeit.

FERRARIS erreichte dies dadurch, dass er durch den einen Stromkreis den Strom einer Wechselstrommaschine gehen liess, und denselben Strom durch die

¹⁾ Vergl. A. DU BOIS-REYMOND, elektrot. Zeitschr. 10, pag. 1—12. 1889.

²⁾ Elektrot. Zeitschr. 11, pag. 158—159. 1890.

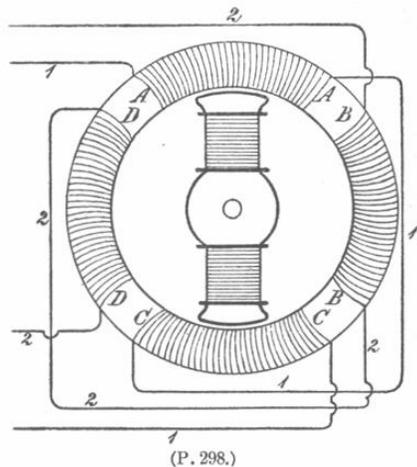
³⁾ G. FERRARIS, Atti della R. Accademia delle scienze die Torino 23, pag. 360. 1888; Elektrot. Zeitschr. 9, pag. 568. 1888.

eine Windungslage eines Transformators führte, während die andere Wickelung desselben mit dem zweiten Stromkreis verbunden war. Bei geeigneter Construction des Transformators und bei Einschaltung passender Widerstände in die beiden Stromkreise kann man bewirken, dass die beiden Wechselströme angenähert die gestellte Bedingung erfüllen. Der Raum in der Nähe des Mittelpunktes kann dann als ein magnetisches Drehfeld bezeichnet werden. Eine auf einer Spitze schwebende Magnetonadel wird in demselben in gleichmässige Rotation versetzt.

Aber auch ein Leiter, welcher um eine vertikale, durch den Mittelpunkt gehende Axe drehbar ist, wird in Rotation versetzt, da hier die Bedingungen des Rotationsmagnetismus erfüllt sind¹⁾. Besteht der Leiter z. B. aus einem vertikalen Cylinder von Kupfer, so inducirt jeder der beiden Wechselströme in demselben Ströme in axialer Richtung. Die elektrodynamische Wirkung der primären auf die secundären Ströme bedingt die Drehung des Cylinders.

Ebenso verhält sich auch ein eiserner Hohlcyliner. Die Wirkung wird hier noch verstärkt, wenn er mit einer Wickelung von Drähten versehen ist, welche in sich geschlossen sind.

Auf denselben Principien beruht ein von TESLA²⁾ angegebener Motor. Das magnetische Drehfeld wird bei demselben durch einen Eisenring (Fig. 298) mit vier Wickelungen *A, B, C, D* geliefert. Von diesen sind *A* und *C*, ferner *B* und *D* mit einander verbunden. Leitet man einen Strom allein durch *A* und *C*, so wird der Ring so magnetisirt, dass die Ringseite *B* nordmagnetisch, die andere Seite süd magnetisch wird. Die Kraftlinien verlaufen daher von *D* nach *B*. Leitet man den Strom allein durch *B* und *D*, so gehen die Kraftlinien innerhalb des Ringes von *C* nach *A*. Gehen durch beide Wickelungen Wechselströme von gleicher Amplitude, aber mit einem Phasenunterschied von 90°, so entsteht in der Nähe des Mittelpunktes ein magnetisches Drehfeld. Innerhalb des Ringes ist ein Anker drehbar, dessen Windungen in sich geschlossen sind. Die Axe desselben wird sich stets in die Richtung der Kraftlinien einzustellen suchen. Derselbe wird also in gleichmässige Rotation versetzt und kann als Motor dienen.



(P. 298.)

Während gleichzeitig ähnliche Anordnungen von BRADLEY und HASELWÄNDER angegeben wurden, war besonders die »Allgemeine Electricitäts-Gesellschaft« in Berlin und speciell der Chefingenieur derselben, DOLIVO-DOBROWOLSKY³⁾, bestrebt, Motoren mit Benutzung von mehreren Strömen verschiedener Phase zu construiren⁴⁾. Letzterer schlug für dieselben die Bezeichnungen Drehstrom und Drehstrommotoren vor.

Wir geben eine kurze Beschreibung dieser Motoren, welche sich auf der elektrotechnischen Ausstellung in Frankfurt a. M. 1891 gut bewährten und eine

¹⁾ Handbuch 3 (2), pag. 407.

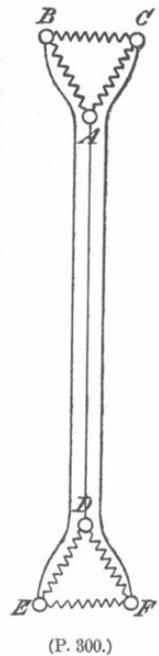
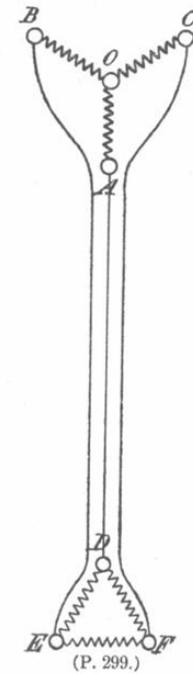
²⁾ A. DU BOIS-REYMOND, Elektrotechn. Zeitschr. 9, pag. 343—345.

³⁾ M. v. DOLIVO-DOBROWOLSKY, Elektrotechn. Zeitschr. 12, pag. 149, 161. 1891.

gewisse Berühmtheit dadurch erlangten, dass sie in Frankfurt in Folge einer Kraftübertragung von Lauffen am Neckar in Bewegung gesetzt wurden.

Wenn bei dem Teslamotor mit zwei Strömen von 90° Phasenunterschied der eine dem Werth $\cos \frac{2\pi t}{T}$, der andere dem Werth $\sin \frac{2\pi t}{T}$ entspricht, so ist für $t = 0$, der erste = 1, der zweite = 0, wenn dagegen $t = \frac{T}{4}$ gesetzt wird, so ist jeder Strom = $\sqrt{\frac{1}{2}}$. Das Magnetfeld hat in diesem Fall nicht allein eine Drehung von 45° erfahren, sondern ist jetzt auch stärker, wie zuvor. Das Magnetfeld ist nicht allein rotirend, sondern auch pulsirend, d. h. die Feldstärke durchläuft bei einer Drehung von 360° vier grösste und vier kleinste Werthe. Durch den letzten Umstand wird die Drehung eines Ankers nachtheilig beeinflusst. Durch Vermehrung der Ankerwickelungen und dementsprechend der Anzahl der eingeleiteten Wechselströme mit verschiedenen Phasen kann die Stärke des Feldes gleichmässiger erhalten bleiben.

In der Praxis ist man bei sechs Wickelungen stehen geblieben, von denen je zwei gegenüberliegende mit einander verbunden sind, so dass drei Ströme von je 120° Phasenunterschied zur Erzeugung des Drehfeldes erforderlich sind. Um derartige Ströme zu erhalten, wird ein Ringanker mit drei Wickelungen versehen, deren Mittelpunkte um 120° von einander abstehen. Rotirt derselbe in dem Magnetfeld einer Dynamomaschine an Stelle des gewöhnlichen Ankers, so kann man von den Enden der einzelnen Wickelungen die oben bezeichneten drei Wechselströme erhalten. Um dieselben zu dem Motor zu führen, wären allerdings drei Leitungen, also im Ganzen sechs Drähte, nöthig. Die Anzahl derselben lässt sich durch geeignete Verzweigung der Mehrphasenströme auf drei heruntersetzen. Dies kann nach zwei verschiedenen Anordnungen geschehen, welche DOLIVO-DOBROWOLSKY als offene und als geschlossene Verkettung der Mehrphasenströme bezeichnet.



Dieselben sind in den Fig. 299 und 300 dargestellt.

Es seien bei der zweiten Anordnung AB, BC, CA die Wickelungen des Generators, DE, EF, FD diejenigen des Motors. In AB, BC, CA seien die elektromotorischen Kräfte thätig:

$$E_1 = E \sin \frac{2\pi t}{T},$$

$$E_2 = E \sin \left(\frac{2\pi t}{T} - \frac{2\pi}{3} \right)$$

$$E_3 = E \sin \left(\frac{2\pi t}{T} - \frac{4\pi}{3} \right).$$

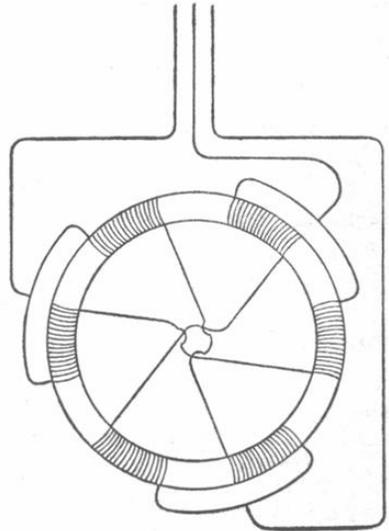
Man hat zunächst zu beachten, dass für jeden Werth von t :

$$E_1 + E_2 + E_3 = 0.$$

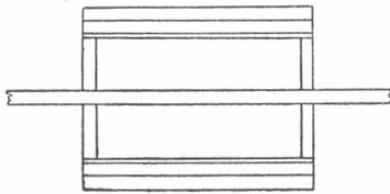
Ferner zeigen die Gesetze der Stromverzweigung, wenn man von Selbstinduction absehen darf, und wenn die Widerstände der correspondirenden

Leitungen einander gleich sind, dass die Stromintensitäten in DE , EF , FD den elektromotorischen Kräften E_1 , E_2 , E_3 einzeln proportional sind. Zu einem ähnlichen Resultat führt die erste Anordnung.

In der Praxis ist es zweckmässig, die Mehrphasenströme zunächst zu einem Transformator zu leiten, aus welchem sie als hochgespannte, verkettete Dreiphasenströme zu einem zweiten Transformator durch die Fernleitung mit drei Drähten gehen. Aus diesem werden sie sodann dem Drehstrommotor in niedriger Spannung mitgeteilt. Für letzteren sind bereits verschiedene Constructionen vorhanden. Der Hauptsache nach wird das Drehfeld erzeugt durch einen eisernen Hohlzylinder, welcher nach Art eines GRAMMEschen Ringes mit den sechs Wickelungen versehen ist (Fig. 301). Der Anker besteht (Fig. 302 und 303) aus einem Eisencylinder in dem Hohlraum des ersteren. Die Eisenmasse enthält eine Reihe von Durchbohrungen in der Längsrichtung, durch welche dicke Kupferdrähte geführt sind, welche durch zwei Endplatten oder Ringe von Kupfer leitend verbunden sind. Der Drehstrommotor besitzt erhebliche Vorzüge selbst

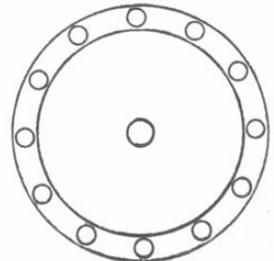


(P. 301.)



(P. 302.)

vor den Gleichstrommotoren. Der Anker besitzt keine Zuleitung von aussen. Derselbe geht von selbst an, sowie Drehstrom durch die äusseren Windungen geht und bleibt in Drehung bei mehr



(P. 303.)

oder weniger Belastung.

Ueber den Drehstrom und das Drehfeld sind zahlreiche Abhandlungen erschienen. Wir erwähnen die folgenden:

SAHULKA, Theorie des FERRARIS'schen Drehfeldes. Elektrotechn. Zeitschr. 12, pag. 537, 549, 561. 1891.

SOHLMANN, Zur Theorie des mehrphasigen Wechselstrommotors. Elektrotechn. Zeitschr. 12, pag. 575. 1891.

KOLLERT, Zur Theorie des Drehstromes. Elektrotechn. Zeitschr. 13, pag. 171, 181. 1892.

Ferner sind Demonstrationsapparate construirt worden, welche die Wirksamkeit eines Drehstromes darthun sollen, sowie kleine Drehstrommaschinen und Drehstrommotoren zum Gebrauch in den Laboratorien. Wir müssen uns hier mit einem kurzen Hinweis auf die betreffenden Abhandlungen begnügen.

W. WEILER, Apparat für Wechsel- und Drehströme. Elektrotechn. Zeitschr. 13, pag. 138. 1892.

WEINHOLD, Demonstrationsapparat für Drehfeld. Elektrotechn. Zeitschr. 13, pag. 300 u. 370. 1892.

FEIN, Neue Apparate für Unterrichts- und Laboratorienzwecke. Elektrotechn. Zeitschr. 13, pag. 432. 1892. Hier ist eine Maschine beschrieben, welche als Gleichstrommaschine, Wechselstrommaschine und Dreiphasenstrommaschine dienen kann. Dieselbe kann auch benutzt werden, um Gleichstrom in Wechselstrom oder Drehstrom zu transformiren.

Wie schon erwähnt, hat die Benutzung des Drehstroms bei Gelegenheit der elektrotechnischen Ausstellung in Frankfurt a. M. 1891 eine erste Probe glänzend bestanden¹⁾. Derselbe vermittelte eine Kraftübertragung von Lauffen am Neckar nach Frankfurt auf eine Entfernung von 175 km. Die Triebkraft in Lauffen wurde durch eine Turbine von 300 Pf.-K. geliefert, welche durch die Wasserkraft des Neckar in Bewegung gesetzt wurde. Durch dieselbe wurde eine Drehstrommaschine in Betrieb gesetzt. Dieselbe gab bei 150 Umdrehungen 1400 Ampère von

50 Volt. Spannung. Die drei Ströme von je 120° Phasenunterschied gingen zuerst zu einem Transformator mit dem Transformationscoefficienten 1:160. Hierauf führten drei Drahtleitungen, bestehend aus Kupferdraht von 4 mm Durchmesser die Ströme nach Frankfurt.

Die gute Isolirung der langen Linie wurde durch Benutzung von Oelisolatoren bewirkt. Die Fig. 304 und 305 geben eine Ansicht von denselben. Das Oel befindet sich in den kreisförmigen Rinnen *R*. In Frankfurt wurde der hochgespannte Strom durch einen zweiten Transformator in starken niedrig gespannten Strom umgesetzt.

Die eine Hälfte des Stromes diente dazu, 1000 Glühlampen zu speisen. Die andere Hälfte wurde zum Betriebe eines Drehstrommotors verwandt, dessen Maximalleistung auf 100 Pf.-K. berechnet war. Durch denselben wurde eine Centrifugalpumpe in Bewegung gesetzt, welche einen Wasserfall von 10 m Höhe speiste.

Der Wirkungsgrad der Anlage betrug nach dem officiellen Bericht 75%.

M. Systeme der Stromvertheilung bei Electricitätswerken.

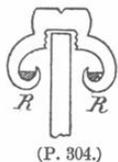
In einer grösseren Anzahl von Städten sind bereits Centralen errichtet, von denen aus den einzelnen Abnehmern Strom zum Zweck der Beleuchtung oder der Kraftübertragung zugeführt wird. Hierbei ist eine grössere Anzahl von Vertheilungssystemen zur Anwendung gekommen, von denen wir eine kurze Uebersicht geben²⁾.

- 1) Eine Hauptstation. Stromvertheilung nach:
 - a) dem Zweileitersystem,
 - b) dem Mehrleitersystem,
 - c) dem Mehrleitersystem mit Ausgleichmaschinen,
 - d) dem Mehrleitersystem mit Ausgleichung durch Accumulatoren.
- 2) Mehrere Centralstationen.
- 3) Eine Hauptstation mit Secundärstationen.
- 4) Eine Hauptstation mit Transformatoren.

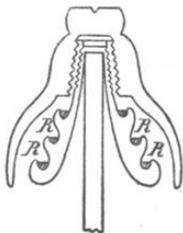
Die Frage, welches dieser Systeme zu bevorzugen ist und ob der Betrieb mit Gleichstrom oder Wechselstrom vorzuziehen ist, kann noch als eine offene betrachtet werden. Ihre Beantwortung wird sich durch die lokalen Verhältnisse jeder Anlage ergeben.

¹⁾ UPPENBORN, Elektrotechn. Zeitschr. 13, pag. 378, 388. 1892.

²⁾ O. v. MILLER, Elektrotechn. Zeitschr. 12, pag. 613. 1891.



(P. 304.)



(P. 305.)

Technische Anwendungen der Induction.

II. Telephonie.

A. Einleitung. Allgemeines. Historisches.

Die Entdeckung, dass man Töne und Geräusche, insbesondere auch die menschliche Sprache mit wenig veränderter Klangfarbe in sehr grossen Entfernungen reproduciren resp. hörbar machen kann, hat sehr bald eine überraschend grosse praktische Bedeutung erhalten. In kürzester Zeit bedeckten sich die grösseren Städte mit einem Netz von Telephondrähten. Von Jahr zu Jahr wächst die Bedeutung des Fernsprechers für den Geschäftsverkehr. Endlich sind in den letzten Jahren mit Erfolg telephonische Verbindungen zwischen Orten hergestellt worden, deren Entfernung mehr als 1000 *km* beträgt.

Diese Resultate konnten nur bei Benutzung des elektrischen Stromes erreicht werden.

Der Natur der Sache nach muss daher jede Fernsprecheinrichtung aus zwei Apparaten bestehen (dem Sender und dem Empfänger), welche durch eine Drahtleitung verbunden sind. Der Sender muss unter dem Einfluss des Schalls einen elektrischen Strom hervorbringen, dessen Veränderungen durch die Natur der Schallschwingungen bedingt sind. In dem Empfänger muss umgekehrt durch den elektrischen Strom ein Mechanismus erregt werden, welcher seinerseits Luftschwingungen erzeugt.

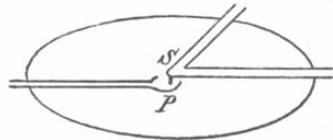
Die erste Einrichtung, Schall (zunächst musikalische Töne) auf grössere Entfernungen zu übertragen, wurde im Jahre 1860 durch PHILIPP REISS¹⁾ getroffen.

Der Sender desselben besteht aus einem Holzkästchen, in dessen Deckel eine kreisförmige Oeffnung sich befindet, welche durch eine Membran verschlossen ist (Fig. 306). An derselben ist in der Mitte eine kleine kreisförmige Platinplatte (*P*) mit einem radialen Streifen Platinblech befestigt. Darüber ist ein Winkelstück von Messing angebracht. Ein kleiner Stift *S* berührt nahezu die Platinplatte. Wird die Membran durch einen Ton in Schwingungen versetzt, so erfolgt bei jeder Schwingung ein einmaliger Contact. In Folge dessen wird jedesmal ein mit Platinplatte und Messingstück verbundener Stromkreis geschlossen.

Der in denselben Stromkreis eingeschaltete Empfänger besteht aus einer langgestreckten Drahtrolle mit einer Stricknadel als Eisenkern. Bei der Magnetisirung durch einen veränderlichen Strom erfährt die Nadel Verlängerungen und Verkürzungen, welche durch zwei an den Enden befestigte Holzstücke auf einen Resonanzkasten übertragen werden und Töne hervorbringen, deren Höhe mit derjenigen des erregenden Tones übereinstimmt.

Denselben Zweck erfüllen eine Reihe von Apparaten, von VARLEY, LACOUR und Anderen, welche gewöhnlich als Musiktelephone bezeichnet werden. Sie waren aber sämmtlich ungeeignet, die menschliche Sprache zu übertragen.

Erst im Jahre 1875 wurde durch GRAHAM BELL ein auf wesentlich anderen Principien beruhendes Telephon construiert, welches sofort praktisch zum Fernsprechen verwandt werden konnte.



(P. 306.)

¹⁾ Jahresbericht des physikalischen Vereins zu Frankfurt a. M. 1860 u. 1861.

Dasselbe hat besonders die folgenden Vorzüge:

- a) Derselbe Apparat kann als Sender und Empfänger dienen.
- b) Galvanische Ketten sind bei der Uebertragung der Sprache nicht erforderlich.
- c) Die durch das BELL'sche Telephon erregten, elektrischen Ströme sind nicht discontinuirlich, sondern es sind Wechselströme.
- d) Das Telephon ist leicht zu handhaben, stets zum Gebrauch bereit.

Hiernach kann also das Telephon an beiden Stationen (zum Sprechen und zum Hören) benutzt werden. Dies geschah anfänglich fast überall.

Dagegen hat man später, bei Beibehaltung des Telephons als Empfänger, für den Sender einen anderen, kurze Zeit nachher erfundenen Apparat, das Mikrophon benutzt, der dann besonders vorzuziehen ist, wenn es sich um die Uebertragung von schwachem Schall durch Leitungen von grossem Widerstand handelt.

Wir gehen nun zu einer kurzen Beschreibung der eben genannten Apparate, sowie der für den Fernsprechverkehr getroffenen Einrichtungen über, indem wir für alle Einzelheiten auf die folgenden Specialwerke verweisen.

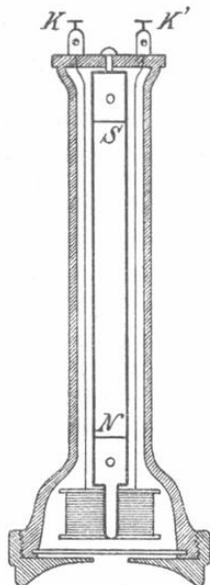
TH. SCHWARTZE, Telephon, Mikrophon, Badiophon. A. HARTLEBEN's Elektrotechnische Bibliothek. 3. Aufl. 1892.

C. GRAWINKEL, Lehrbuch der Telephonie und Mikrophonie. Berlin, J. SPRINGER. 1884. —

V. WIETLISBACH, Die Technik des Fernsprechens. A. HARTLEBEN's Elektrotechnische Bibliothek. 1886.

B. Telephon und Mikrophon.

Das BELL'sche Telephon besteht (Fig. 307) aus einem Stahlmagnet (meist vier prismatische Lamellen) NS Derselbe ist mit Polschuhen aus weichem Eisen versehen, von denen der eine eine Spirale von dünnem, gut isolirtem Draht und ziemlich grossem Widerstand trägt. Unmittelbar darüber ist in dem Holzgehäuse des Magnets eine dünne Eisenmembran befestigt.



Wird durch die Schallöffnung gegen dieselbe gesprochen, so wird der Magnetismus des aus Stahlmagnet und Eisenmembran bestehenden Systems vergrössert oder verkleinert, je nachdem die Membran sich dem Pol nähert oder von ihm entfernt. Dementsprechend entstehen in der Drahtrolle periodisch verlaufende Ströme, welche den Schwingungen der Eisenmembran genau entsprechen. Von den Klemmschrauben KK' des ersten Telephons geht der Wechselstrom zu den Polklemmen des zweiten Telephons und verstärkt oder schwächt dort die magnetische Wirkung des Stahlmagnets auf die Eisenplatte c . In Folge dessen führt dieselbe eine Schwingungsbewegung aus, welche sie der Luft mittheilt. Die Verdichtungen und Verdünnungen repräsentiren daher eine der ersten sehr ähnliche Schallbewegung, allerdings von viel geringerer Intensität.

Das BELL'sche Telephon muss gerade in Folge seiner Einfachheit in konstruktiver Beziehung als ein Meisterwerk bezeichnet werden.

Die einzige, wesentliche Verbesserung, welche dasselbe später erfahren hat, besteht in der Ersetzung des einfachen Magnetstabes durch einen Hufeisenmagnet.

Hierdurch wird erreicht, dass die Eisenmembran in zwei Punkten anstatt in einem angegriffen wird und dadurch Schwingungen von grösserer Amplitude ausführt, und dass andererseits die Inductionswirkung verdoppelt wird, indem man beide Pole mit Rollen versieht.

Zweipolige Telephone wurden construiert von SIEMENS und HALSKE, ADER, GOWER u. A.

Das Telephon ist stets als Empfänger benutzt worden. Dagegen wird es gewöhnlich vortheilhafter sein, als Sender einen Apparat zu gebrauchen, welcher Wechselströme von grösserer Amplitude hervorbringt, als ein Telephon. Dies leistet das Mikrophon. Dasselbe wurde in principiell sehr ähnlichen Formen, gleichzeitig von R. LÜDTGE, HUGHES, BERLINER u. A. im Jahre 1878 angegeben.

Bei diesem Apparat bewirken die Luftschwingungen in der folgenden Weise periodische Veränderungen eines elektrischen Stromes.

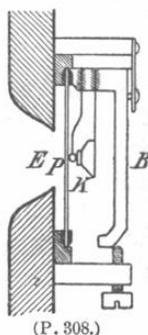
Eine dünne, gegen Schallschwingungen empfindliche Platte (meist von Holz) trägt zwei Stücke von Kohle, welche mit schwachem Druck gegen einander gepresst sind.

Bei Erregung der Platte durch den Schall wird die Berührungsstelle der beiden Kohlenstücke derart verändert, dass ihr Widerstand gegen einen hindurchgehenden, galvanischen Strom abwechselnd grösser und kleiner wird. An Stelle der Kohle kann man auch andere leitende Substanzen, besonders Metalle, benutzen. Die Empfindlichkeit wird vergrössert, wenn man mehrere veränderliche Kontakte in den Stromkreis einschaltet.

Die Mikrophone haben für den praktischen Gebrauch eine Reihe verschiedener Constructionen erhalten, von denen sich diejenigen von ADER, CROSSLEY, BERLINER und BLAKE besonders bewährt haben.

Als Beispiel lassen wir hier eine kurze Beschreibung eines BLAKE'schen Mikrophons folgen.

Der Schall trifft bei demselben (Fig. 308) zunächst die Eisenmembran *E*, gegen welche die Kontakte *P* und *K* mit schwachem Druck sich anlehnen. Hiervon ist *P* eine kleine, an einer schwachen Feder befestigte Platinkugel, *K* eine in einer Messingfassung sitzende Kohlenplatte. Die ganze Kontaktvorrichtung ist an einem Eisenbügel *B* befestigt. Durch Anziehen der Schraube *S* kann man bewirken, dass der Druck, mit welchem *E*, *P*, *K* gegen einander gepresst werden, grösser wird. Bei Erregung der Eisenplatte durch Schall nimmt der Druck zwischen *P* und *K* periodisch zu und ab.



(P. 308.)

Ist in den Stromkreis des Mikrophons und einer Kette, welche nicht zu stark sein darf, ein Telephon eingeschaltet, so wirken die Stromschwankungen bei Erregung des veränderlichen Contactes auf dasselbe derart, dass es tönt.

In der Praxis hat man es aber aus verschiedenen Gründen vorgezogen, den Batteriestrom nicht direkt durch das Telephon zu leiten, sondern für letzteres einen Inductionsstrom zu benutzen, welcher durch die Schwankungen des Batteriestromes hervorgebracht wird. Letzterer geht deshalb durch die eine Wickelung eines kleinen Inductionsapparats mit Eisenkern, während das Telephon mit den secundären Windungen in Verbindung steht. Das Inductorium ist gewöhnlich innerhalb des Holzkastens des Mikrophons angebracht. Die primäre Wickelung besteht aus einer kleineren Anzahl Windungen eines dicken, die secundäre Wickelung dagegen aus einer grossen Anzahl Windungen dünnen Drahts.

Hierdurch wird zunächst bewirkt, dass in dem Kreis des Telephons kein constanter Strom verläuft, sondern ein Wechselstrom. Da gewöhnlich die Windungen des Telephons einen grösseren Widerstand besitzen und hierzu noch der Widerstand von Leitungen kommt, deren Länge unter Umständen 1000 *km* übersteigt, so würde der Batteriestrom sehr schwach sein und die Widerstandsänderungen der Contactstelle nur einen sehr kleinen Bruchtheil des Gesamtwiderstandes betragen. Durch die getroffene Anordnung erhält dagegen der secundäre Stromkreis eine sehr viel höhere elektromotorische Kraft. Die Amplituden des Wechselstroms haben daher trotz des grossen Widerstandes noch einen beträchtlichen Werth.

C. Fernsprechanlagen.

Nach den bisherigen Auseinandersetzungen würde eine praktisch brauchbare Fernsprecheinrichtung in ihrer einfachsten Form für jeden Theilnehmer aus einem Sender (Telephon oder Mikrophon) und einem Empfänger (Telephon) bestehen, wobei eventuell dasselbe Telephon für beide Zwecke dienen kann. Hierzu kommt aber noch eine Vorrichtung, durch welche man benachrichtigt wird, dass eine Unterredung beginnen soll oder umgekehrt, durch welche der Theilnehmer selbst seinen Wunsch zu sprechen ausdrücken kann.

Es dient dazu eine elektromagnetische Klingel, welche als Wecker bezeichnet wird. Dieselbe wird entweder dadurch erregt, dass eine galvanische Kette geschlossen wird (Batteriewecker), oder durch Drehung einer kleinen magnetelektrischen Maschine (Wechselstromwecker). Wird die erste Form benutzt, so ist die Einrichtung getroffen, dass durch Abnehmen des Telephons von dem Fernsprechapparat der Stromschluss erfolgt. Dient ein Mikrophon als Sender, so wird ebenfalls durch Abnehmen des Telephons der Stromkreis desselben geschlossen.

Die angeführten Apparate, die gewöhnlich an einem Brett befestigt sind, bilden eine Einzelstation. Von derselben geht eine Leitung nach einer Centralstation, dem Vermittelungsamt.

Die Leitungen werden entweder oberirdisch oder unterirdisch geführt und bestehen aus dünnem Kupferdraht.

Laufen, wie gewöhnlich, mehrere Leitungen längere Strecken parallel neben einander, so tritt der Uebelstand ein, dass der Wechselstrom der einen Leitung inducirend auf die Nachbarleitungen wirkt, so dass man auf derselben ebenfalls das in der ersten Leitung geführte Gespräch hören kann und dass durch die Nebengeräusche die Verständigung erschwert ist. Bei oberirdischen Leitungen wird dies am einfachsten vermieden, wenn man, mit Verzicht auf Benutzung der Erdleitung, die Verbindung durch zwei neben einander laufende Drähte herstellt (Schlaufe), da jetzt die in dem einen Draht inducirte elektromotorische Kraft durch eine gleich grosse, aber entgegengesetzt wirkende Kraft in dem zweiten Draht aufgehoben wird.

Unterirdische Leitungen werden benutzt, wenn die Anzahl paralleler Leitungen auf derselben Strecke sehr gross ist. In diesem Fall werden die einzelnen, isolirten Leitungen zu einem Kabel vereinigt. Hier würde die Wechselinduction noch störender wirken. Man hat verschiedene Methoden, dieselbe zu verringern, z. B. dadurch, dass man jeden einzelnen Draht mit einer dünnen, metallischen Schutzhülle (Stanniol) versieht.

Eine eingehendere Beschreibung einer Centralstation würde hier zu weit führen. Es müssen dort zunächst Signalapparate vorhanden sein, welche den

Beamten auf diejenigen Theilnehmer aufmerksam machen, welche eine Fernsprechverbindung wünschen, ferner Vorrichtungen (Umschalter), durch welche der Beamte die Verbindung zwischen den beiden Theilnehmern herstellt, welche mit einander sprechen wollen.

Bei der deutschen Reichspostverwaltung dient hierzu der Klappenschrank. Die Verbindung wird durch Einsetzen zweier Stöpsel mit einer Verbindungsschnur in Löcher an der erwähnten Vorrichtung bewirkt.

D. Telephon und Mikrophon als physikalische Apparate.

Die genannten Apparate waren zunächst erfunden worden, um dem praktischen Zweck der Verständigung auf grosse Entfernungen zu dienen. Dass sie denselben sofort und in überraschender Weise erfüllten, rief das Bestreben hervor, ihre Wirkungsweise in allen Einzelheiten kennen zu lernen und die dabei vorkommenden elektrischen und akustischen Vorgänge genauer zu verfolgen.

Ausserdem erwies sich besonders das Telephon als ein bequemer und nützlicher Apparat, schwache elektrische Ströme wahrzunehmen, und kann, ebenso wie auch das Mikrophon, noch zu manchen anderen Zwecken bei wissenschaftlichen Untersuchungen verwandt werden.

Wir schliessen mit einigen Bemerkungen über diese beiden Gegenstände.

1. Eine der merkwürdigsten Eigenschaften des Telephons ist seine Empfindlichkeit gegen die Einwirkung schwacher Ströme. Man hat deshalb mehrfach festzustellen gesucht, welche Minimalstärke ein Strom besitzen muss, wenn ein bestimmtes Telephon bei dem Durchgange des Stromes durch seine Wicklung einen noch eben wahrnehmbaren Schall hervorbringt.

Nach den ersten Versuchen hierüber von WARREN DE LA RUE¹⁾, PELLAT²⁾ und Anderen lag die Intensität des Minimalstromes bei 10^{-9} Amp. Genauere Versuche (mit Berücksichtigung der Schwingungszahl des erregenden Tones) hat FERRARIS³⁾ angestellt. Bezeichnet man die Schwingungszahl mit n , die Minimalstromstärke mit i , so erhielt derselbe die folgenden Resultate:

	n	i
c_3	269	$23 \cdot 10^{-9}$ A.
f_3	352	$17 \cdot 10^{-9}$ „
a_4	440	$10 \cdot 10^{-9}$ „
c_4	523	$7 \cdot 10^{-9}$ „
d_4	594	$5 \cdot 10^{-9}$ „

Die Empfindlichkeit des Telephons nimmt also erheblich mit der Tonhöhe zu.

Uebrigens scheint bei diesen Versuchen auch viel auf die Art der Ton erregung, also auf die Klangfarbe des Tons anzukommen. FERRARIS benutzte die Wirkung eines Stromes, welcher durch einen WAGNER'schen Hammer unterbrochen wurde. Lord RAYLEIGH⁴⁾ schickte dagegen einen Wechselstrom durch das Telephon, welcher durch einen rotirenden Magnet oder durch die Schwingungen einer magnetisirten Stimmgabel in einer Inductionsrolle erregt wurde.

¹⁾ WARREN DE LA RUE, Beibl. 3, pag. 47.

²⁾ PELLAT, Beibl. 5, pag. 624. 1881.

³⁾ FERRARIS, Atti di Torino 13. 1878. — Beibl. 3, pag. 43.

⁴⁾ Lord RAYLEIGH, Phil. Mag. (5), pag. 285—295. 1894.

Der Verlauf eines solchen Stromes lässt sich durch eine Sinusfunction der Zeit ausdrücken.

Die Werthe der minimalen Stromstärke liegen etwas höher, wie die folgende Tabelle zeigt.

	<i>n</i>	<i>i</i>
Stimmgabel	128	$2800 \cdot 10^{-9}$ A.
Rotr. Magnet	192	$250 \cdot 10^{-9}$ „
Stimmgabel	256	$83 \cdot 10^{-9}$ „
Rotir. Magnet	370	$49 \cdot 10^{-9}$ „
Stimmgabel	320	$32 \cdot 10^{-9}$ „
„	384	$15 \cdot 10^{-9}$ „
„	512	$7 \cdot 10^{-9}$ „
„	640	$4.4 \cdot 10^{-9}$ „
„	768	$10 \cdot 10^{-9}$ „

Die Schwingungsweite der Eisenmembran bei den schwächsten Bewegungen, bei welchen eben noch der Schall wahrnehmbar ist, beträgt ungefähr ein Milliontel Millimeter¹⁾.

Die Schallübertragung durch Combination zweier Telephone ist ein Vorgang, der eine grosse Analogie mit der Kraftübertragung hat. Man kann daher nach dem Verhältniss der Intensität des primären Schalles, welcher den Sender erregt, zu der Intensität der secundären Schallbewegung fragen, welche der Empfänger ausgiebt. Hierüber liegt eine Untersuchung von K. VIERORDT²⁾ vor. Derselbe producirt einen Schall von messbarer Intensität, indem er eine Kugel auf eine Zinnplatte aus gemessener Höhe fallen liess. Ein über der Platte angebrachtes Telephon wird hierdurch erregt und die Intensität des Schalles soweit vermindert, dass derselbe in einem zweiten, entfernten Telephon eben noch hörbar ist. Hierauf wird der Schall abermals erregt, das Telephon aber durch das Ohr des Beobachters ersetzt und abermals das Minimum der Schallintensität bestimmt, welches eben noch wahrnehmbar ist. Die Schallintensität war im ersten Fall 577 Mal grösser als im zweiten. Der Empfänger würde hiernach nur $\frac{1}{577}$ der Schallintensität reproduciren, welche den Sender trifft.

Untersuchungen des Verlaufs der Telephonströme, besonders bei einer mehrfachen Uebertragung durch Transformatoren, wurden schon früher besprochen³⁾. Neuere Versuche über den Verlauf dieser Ströme in längeren Leitungen wurden von A. FRANKE⁴⁾ angestellt. Es spielt dabei, ausser der Selbstinduction, die Capacität der Drähte eine wichtige Rolle.

2) Das Telephon hat vielfache Anwendung gefunden, schwache Ströme, besonders schwache Wechselströme nachzuweisen und zu constatiren, dass dieselben in einem Leitungszweig zum Verschwinden gebracht worden sind.

Besonders wurde dasselbe zuerst von F. KOHLRAUSCH⁵⁾ angewandt bei der Bestimmung des Widerstandes von Flüssigkeiten mit Hilfe von Wechselströmen.

¹⁾ A. FRANKE, Elektrotechn. Zeitschr. 11, pag. 289. 1890.

²⁾ K. VIERORDT, WIED. Ann. 19, pag. 207—213. 1883.

³⁾ Handbuch (3) 2, pag. 395.

⁴⁾ A. FRANKE, Elektrotechn. Zeitschr. 12, pag. 447 u. 458. 1891.

⁵⁾ F. KOHLRAUSCH, WIED. Ann. 11, pag. 656. 1880.

Wir führen hier nur noch einige Abhandlungen an, welche das Verhalten des Telephons bei dieser Methode betreffen.

BOUTY et FOUSSEREAU, Compt. rend. 101, pag. 373—375. 1888.

M. WIEN, WIED. Ann. 42, pag. 593—621. 1891.

A. ELSASS, WIED. Ann. 44, pag. 666—680. 1891.

F. KOHLRAUSCH, WIED. Ann. 49, pag. 225—251. 1893.

Zur Bestimmung von Dielektricitätsconstanten wurde das Telephon benutzt von:

A. WINKELMANN, WIED. Ann. 38, pag. 161—172. 1889. — A. ELSASS, WIED. Ann. 44, pag. 654—665. 1891.

Ueber eine Discussion dieser Methode vergl.

E. COHN, WIED. Ann. 46, pag. 135—138. 1892. — A. WINKELMANN, WIED. Ann. 46, pag. 666—680. 1892.

Ueber das Verhalten des Telephons gegen hoch gespannte Elektrizität hat L. WEBER¹⁾ bemerkenswerthe Versuche angestellt.

Auch unter dem Einfluss eines Magnetfeldes von wechselnder Intensität giebt ein Telephon Töne, ohne dass es nöthig wäre, einen Strom durch das selbe zu senden. Versuche hierüber hat S. KALISCHER²⁾ angestellt.

Wird das Telephon direkt durch einen intermittirenden Strom oder durch einen Wechselstrom erregt, so kann dasselbe bei akustischen Versuchen als Schallquelle dienen³⁾.

Endlich kann das Mikrophon zu akustischen Untersuchungen, besonders zur Messung der Schallstärke benutzt werden⁴⁾. A. OBERBECK.

Pyro- und Piëzoelektricität.

I. Pyroelektricität.

Aelteste Beobachtungen. Gewisse Krystalle besitzen die Eigenschaft, durch Temperaturänderungen Elektrizität zu entwickeln: man bezeichnet dieselben nach BREWSTER⁵⁾ als pyroelektrisch. Zuerst beobachtet wurde diese Eigenschaft im Jahre 1703 am Turmalin aus Ceylon, indem holländische Juweliere bemerkten, dass dieser, wenn er auf glühende Kohlen gelegt worden war, Aschentheilchen anzog und wieder abstieß. Die elektrische Natur dieser Wirkungen erkannte zuerst AEPINUS⁶⁾ 1756, welcher auch beobachtete, dass an den beiden Enden der Turmalinprismen stets entgegengesetzte elektrische Pole auftreten, und dass deren Vorzeichen bei der Erwärmung das umgekehrte ist, wie bei der Abkühlung, so dass also der eine Pol (der analoge nach RIESS' Bezeichnung) beim Erwärmen, der andere (der antiloge) beim Erkalten positiv elektrisch wird.

¹⁾ L. WEBER, WIED. Ann. 8, pag. 515—525. 1879.

²⁾ S. KALISCHER, WIED. Ann. 41, pag. 484—502. 1890.

³⁾ Vergl. M. WIEN, WIED. Ann. 36, pag. 834—887. 1889.

⁴⁾ A. OBERBECK, WIED. Ann. 13, pag. 222—255. 1881 u. G. STERN, WIED. Ann. 42, pag. 622—638. 1891.

⁵⁾ BREWSTER, Edinb. Journ. of Science I, pag. 208. 1825. POGG. Ann. 2, pag. 298. 1824.

⁶⁾ AEPINUS, Mém. Akad. Berlin 1756, pag. 105; Recueil sur la tourmaline, Petersburg 1762.