

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band: 33 (1942)
Heft: 1

Artikel: Zur Geschichte der Dynamomaschine
Autor: [s.n.]
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1061628>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 24.04.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Zur Geschichte der Dynamomaschine

9: 621.313

Am 17. Januar 1942 gedenkt die Welt des Tages, an dem Werner Siemens vor 75 Jahren (1867) der Berliner Akademie der Wissenschaften seine Arbeit «Ueber die Umwandlung von Arbeitskraft in elektrischen Strom ohne Anwendung permanenter Magnete» vorlegte und damit die Entdeckung des dynamoelektrischen Prinzips sowie die Erfindung der Dynamomaschine bekanntgab.

Im vierten Jahrzehnt des vorigen Jahrhunderts erhielt die Frage der Stromerzeugung praktische Bedeutung, nachdem sie bis dahin lediglich vom physikalischen Standpunkt aus behandelt worden war. Man kannte um diese Zeit bereits einige Anwendungsgebiete des elektrischen Stroms. Es gab elektromagnetische Antriebsmotoren, die auf einen unbekannten Korrespondenten Faradays, sowie auf Sturgeon, den Erfinder des Elektromagneten zurückgehen; man kannte ferner die Fähigkeit des elektrischen Stroms, Licht zu erzeugen, und bediente sich dabei entweder des von Davy 1813 entdeckten Lichtbogens oder des durch elektrolytische Wasserzerlegung gewonnenen Knallgases, mit dem man Kalk erhitzte und so zum Kalklicht kam (Drummond, 1826). Ende der 30er Jahre fing man an, die Beobachtung, dass sich das in einem Element elektrolytisch niedergeschlagene Kupfer allen Feinheiten der Elektrode anpasst und sie getreu wiedergibt, praktisch auszunutzen und kam so zu einer galvanoplastischen Industrie. Diesen Anwendungsgebieten stand zunächst nur eine einzige Möglichkeit gegenüber, elektrische Energie zu erzeugen, nämlich die in galvanischen Elementen gegebene. Die Induktionsgesetze Faradays von 1831, die vor allem in der Formulierung von E. Lenz (1804 bis 1865) bekannt wurden, zeigten den Weg, elektrische Energie durch die Relativbewegung von Stromleitern und Magneten zu erzeugen und veranlassten zahlreiche Erfinder, den in dem Gesetz angedeuteten Vorgang zu mechanisieren. Es entstanden Maschinen mit drehbaren Magneten wie die von Pixii oder mit drehbaren Spulen wie die von Saxton sowie auch mehrpolige Anordnungen wie die von Stöhrer. Alle diese Ausführungen stimmen darin überein, dass ihr Feld aus Dauermagneten gebildet wird, sowie dass ihre Leistung deswegen zunächst begrenzt war. Ihr Anwendungsgebiet war der Experimentiertisch, wo sie nur die Aufgabe hatten, die schwierig zu pflegenden und schmutzigen Batterien zu ersetzen. Daher mag es auch kommen, dass selten der Gedanke auftaucht, an Stelle der Dauermagnete die seit 1826 bekannten Elektromagnete zu verwenden, denn zu ihrer Speisung hätte man Batterien benötigt, die man gerade vermeiden wollte. Erst 1851 wurde durch Wilde in Manchester der Gedankensprung verwirklicht, die Elektromagnete durch eine andere magnetoelektrische Maschine zu speisen. Meistens aber bemühte man sich, die Voraussetzungen zur Erzeugung stärkerer Ströme durch mechanische Vergrößerung aller Teile zu schaffen. Auf dieser Grundlage entstanden die riesigen magnetoelektrischen Maschinen der 50er und 60er Jahre, die, von mehrpferdigen

Le 17 janvier 1942, il y aura 75 ans que Werner von Siemens communiquait à l'Académie des Sciences de Berlin (en 1867) son travail intitulé «De la transformation du travail mécanique en courant électrique, sans l'emploi d'aimants permanents», faisant ainsi part de sa découverte du principe dynamoélectrique et par conséquent de son invention de la dynamo.

Dampfmaschinen getrieben, insbesondere die Bogenlampen auf Leuchttürmen speisten und als Stromquelle für galvanoplastische Anlagen dienten. Daneben trat in den 40er Jahren ein weiteres Anwendungsgebiet des elektrischen Stroms hervor, das die Entwicklung der Stromerzeuger stark befruchtete, nämlich die Telegraphie. Auch hier war man mit den Batterien unzufrieden und ging mehr und mehr zur Verwendung magnetoelektrischer Maschinen über. Die grösste Bedeutung für die Entwicklung hatte der magnetoelektrische Zeigertelegraph von Werner Siemens mit dem Doppel-T-Anker (Fig. 1). Die Ueberlegenheit lag darin be-

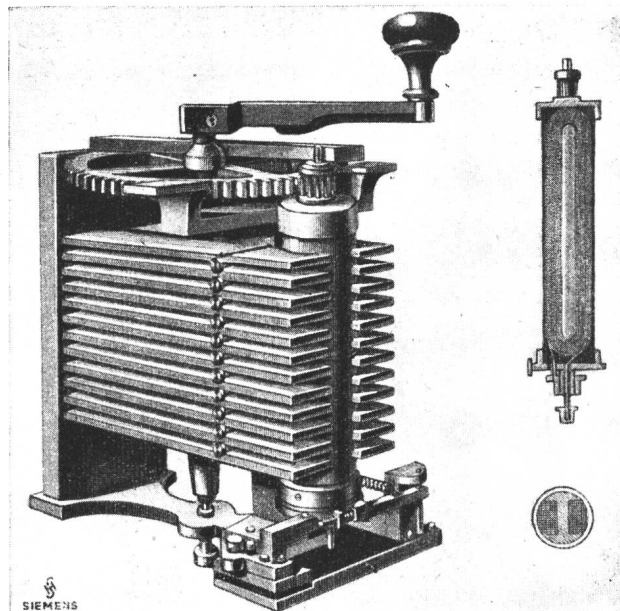


Fig. 1.
Magnetoelektrischer Zeigertelegraph von Werner Siemens mit Doppel-T-Anker (1856).

gründet, dass er infolge seines geringen Durchmessers ein kleines Trägheitsmoment hatte und daher eine schnelle Drehung zulässig; ferner darin, dass er sich in entsprechend ausgedrehten Polschuhen mit sehr kleinem Luftspalt unterbringen liess.

Beide Voraussetzungen waren wichtig, damit Werner Siemens aus einem solchen für den Betrieb von Eisenbahnläutewerken vielfach ausgeführten Magnetinduktor die erste Dynamomaschine der Welt entstehen lassen konnte (Fig. 2). Er liess die Stahlmagnete durch zwei Elektromagnete mit passenden Polschuhen ersetzen und schaltete sie so, dass der vom Anker abgenommene Strom durch deren Wicklung hindurchging. Das mag heute als sehr einfach angesehen werden und sozusagen als eine

damals längst fällige Erfindung, tatsächlich schliesst der Vorgang aber ganz andere Denkvoraussetzungen ein als sie damals üblich waren. Werner Siemens hat sich leider nicht dazu entschliessen können, die ihn zur Entdeckung des dynamoelektrischen Prinzips bringenden Gedankengänge aufzuzeichnen, jedoch kann als sicher angenommen werden, dass ihm die Uebersetzung einer Influenzmaschine, wie sie damals von Toepler und Holtz angegeben wurden, ins elektromagnetische vorschwebte. Eine Briefstelle, in der er die Erfindung seinem Bruder Wilhelm mitteilt, heisst nämlich: «Es ist mit andern Worten eine Holtzsche Maschine, angewandt auf Elektromagnetismus.»

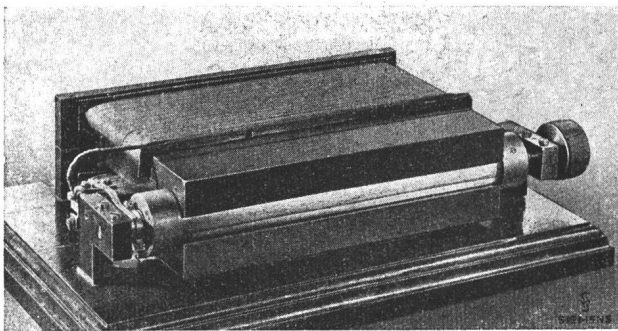


Fig. 2.

Die erste Dynamomaschine der Welt,
Original im Deutschen Museum, München (1866).

Die Uebereinstimmung der beiden Maschinenarten beruht darin, dass in beiden Fällen das von der Maschine Erzeugte benutzt wird, um die Leistung weiter zu steigern. Bei der Influenzmaschine ist es die influenzierte Ladung, bei der Dynamomaschine der elektrische Strom. Bei den älteren Influenzmaschinen führte man zunächst eine Ladung zu und bewirkte mit dieser die Trennung der beiden Elektrizitätsarten, der positiven und negativen, auf dem zu influenzierenden Körper. Sie entsprachen damit einer magnetelektrischen Maschine, bei der die Ladung durch den Magnetismus im Eisen ersetzt ist. Die Maschinen von Toepler und Holtz waren aber so gebaut, dass die influenzierte Ladung wieder zur influenzierenden wurde. Bei der Dynamomaschine ist es so, dass der erzeugte Strom wieder zum erzeugenden Strom wird, indem er nämlich durch die Feldmagnete geschickt wird. Freilich musste auch bei den Influenzmaschinen der neuen Art die Anfangsladung herangebracht werden, wozu schon die Reibung der Bürsten auf den Belegungen genügte. Bei der Maschine von Werner Siemens ist der Ausgangspunkt der Stromerzeugung der in jedem Eisen von einer frühern Magnetisierung zurückgebliebene Magnetismus. Die Holtzsche Maschine musste vor allem so gebaut werden, dass sich die zur influenzierenden Ladung werdende influenzierte Ladung nicht zwischendurch wieder zerstreute. Werner Siemens musste dafür sorgen, dass der von einem Stromstoss erzeugte Magnetismus so lange bestehen blieb, bis sich der nächste Stromstoss auswirken konnte. Er musste

also, da sein Anker nur zwei Pole hatte, besonders hohe, bis dahin kaum angewendete Umdrehungszahlen verwenden, wie sie der Doppel-T-Anker zuließ. In die Gedankengänge Werner Siemens' spielt ferner noch die schon damals bekannte Tatsache hinein, dass eine umlaufende elektromagnetische Maschine, also ein Motor, gleichzeitig einen Strom liefert, der dem antreibenden Strom entgegenwirkt, ihn also schwächt. Auf dieser Erscheinung beruht die merkwürdige Tatsache, die Werner Siemens auch in der eingangs erwähnten Akademievorlesung anführt, dass ein Motor von einer Batterie nicht gespeist werden kann, wenn man nicht ein baldiges Aussetzen der Batterie in Kauf nehmen will. Werner Siemens stellte nun fest, dass der Motor bei Drehung in entgegengesetzter Richtung den Batteriestrom nicht schwächt, sondern ihn verstärkt, die Maschine also zum Stromerzeuger wird. Endlich war seine Maschine so gebaut, dass der magnetische Widerstand sehr gering war, insbesondere der Luftspalt zwischen Anker und Feld sehr gering. Daran liegt es, dass der remanente Magnetismus genügte, um die Stromerzeugung einzuleiten.

Es würde zu weit führen, hier auf die Prioritätsstreitigkeiten einzugehen, die, wie bei jeder Erfindung, auch um die Dynamomaschine entbrannt sind. Wer sich dafür interessiert, sei auf das vorzügliche Buch von Mahr verwiesen¹⁾, das gerade rechtzeitig zu dem Jubiläum herausgekommen ist. Der Verfasser macht es dem Leser sehr leicht, sich selbst ein Urteil zu bilden, wem das grösste Verdienst zukommt, denn es ist mit zahllosen Literaturhinweisen versehen. Der Zusammenhang zwischen den einzelnen Erfindern war damals sehr locker, denn das Schrifttum war noch rückständig, auch fehlte es an einer einheitlichen Begriffssprache, die heute den Gedankenaustausch so erleichtert. Sie sind mehr oder weniger auf getrennten Wegen marschiert und sind dem Ziel mehr oder weniger nahe gekommen. Bei vielen war es bestimmt häufig nur ein Zufall, dass ihre Maschinen angingen, also Strom lieferten, ganz abgesehen davon, dass sich viele nur mit Beschreibungen begnügten oder mit Patentanmeldungen, weil sie in der Stromerzeugung das grosse Geschäft witterten. Vielen Mitteilungen der Erfinder merkt man an, dass sie an eine Stromerzeugung aus dem Nichts glaubten, also ohne Arbeitsaufwand Strom erzeugen wollten. Sogar die Physiker, denen Werner Siemens schon im Dezember 1866 eine Dynamomaschine vorführte, wunderten sich über den grossen Arbeitsaufwand, wenn die Maschine belastet wurde, etwa mit einem Draht, den der Strom durchschmelzen sollte. Wie klar dagegen Werner Siemens sah, geht schon aus dem Titel der Arbeit hervor, in dem er von einer Energieumwandlung spricht. In seinen Lebenserinnerungen sagt er auch, dass man keineswegs leicht zufällig zur Erfindung des dynamoelektrischen Prinzips gelangen konnte, «weil elektromagnetische Maschinen nur bei ganz richtigen Dimensionen und Windungsverhältnissen

¹⁾ Otto Mahr, Die Entstehung der Dynamomaschine, Berlin 1941.

angehen, d. h. bei umgekehrter Drehung ihren Elektromagnetismus selbsttätig fortlaufend verstärken».

Der Nationalstolz der einzelnen Völker, deren Angehörige einen mehr oder weniger wichtigen Beitrag zur Erfindung der Dynamomaschine geliefert haben, hat bekanntlich dazu geführt, dass es viele «Erfinder» gibt. Die Italiener schwören auf Paccinotti, der 1860 den Ringanker als Bestandteil von Motoren angab, sich aber später um die Entwicklung von Stromerzeugern nicht mehr kümmerte. Die Franzosen feiern Gramme, der das dynamoelektrische Prinzip auf den Paccinottischen Ring anwendete, die Engländer Varley und Wheatstone, die kurz vorher oder gleichzeitig auf den gleichen Gedanken wie Werner Siemens kamen, aber ohne Zweifel erst nach Werner Siemens die Sache darstellten oder mit Darstellungen an die Öffentlichkeit traten, so dass Werner Siemens mit Recht von sich sagen konnte, er habe als erster eine entsprechende Mitteilung gemacht vor einer Gesellschaft, die ihre Verhandlungen im Druck niederlegte. Ferner wird der Däne Hjorth als Erfinder der Dynamomaschine genannt. Nach *Mahr* steht es

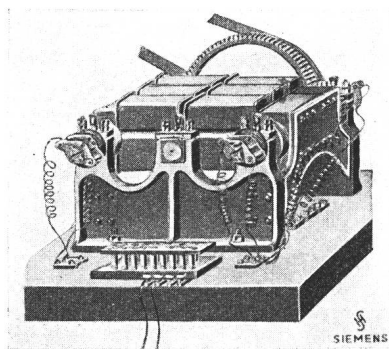


Fig. 3.
Induktor mit zwei Ankern (1867).

fest, dass er das Prinzip der Selbsterregung niedergelegt hat, und zwar schon in einem Patent vom Jahre 1854, fraglich aber bleibt, ob er diesen physikalischen Vorgang in die Praxis der Stromerzeugung hat umsetzen können. Merkwürdig ist auf jeden Fall, dass Hjorth auf der Pariser Weltausstellung von 1867 eine Maschine zeigte, bei der das Prinzip der Selbsterregung *nicht* angewendet war. Alle diese und andere Erfinder, zu denen noch weitere kommen, haben der ganzen Sache nicht so grossen Wert beigelegt, dass sie nun daran gingen, aus ihren Studierstuben und Werkstätten sofort in die Praxis zu gehen, nicht einmal Wheatstone, der über einige industrielle Erfahrung und die notwendigen Verbindungen verfügte. Sie besannen sich auf ihre subjektiv oder objektiv eingebildeten Verdienste erst, als Werner Siemens die Zukunftsaussichten seines Verfahrens der Stromerzeugung am Schluss der erwähnten Akademievorlesung mit den Worten umriss: «Der Technik sind jetzt die Mittel gegeben, Ströme von unbegrenzter Stärke auf billige und bequeme Weise überall da zu erzeugen, wo Arbeitskraft disponibel ist.»

Im Vordergrund des allgemeinen Interesses stand damals die Erzeugung von künstlichem Licht, und darum begann Werner Siemens sofort damit, Maschinen für diesen Zweck zu bauen. Schon auf der Pariser Ausstellung von 1867 wollte er einen zwei-ankerigen Induktor vorführen (Fig. 3), musste aber wegen des Fehlens einer genügend starken Antriebs-

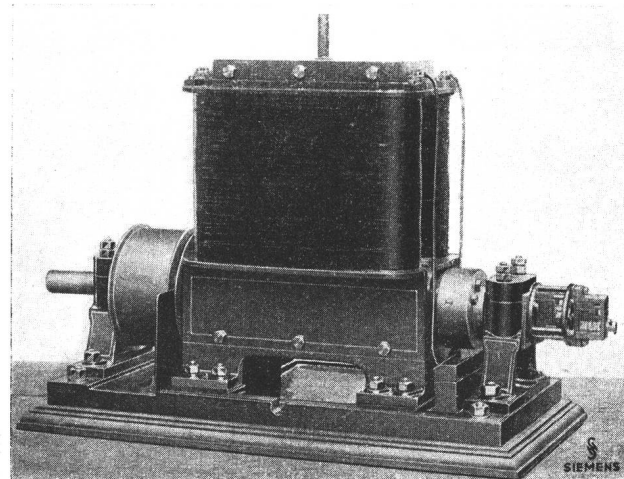


Fig. 4.
Wassergekühlte Maschine mit Doppel-T-Anker (1868).

kraft darauf verzichten. Im gleichen Jahr aber baute er schon Beleuchtungswagen und lieferte sie zur Beleuchtung auf einem Schiessplatz und auf Baustellen. Die Erwärmung des massiven Ankereisens wurde zunächst mit einer Wasserkühlung bekämpft (Fig. 4). Einen starken Auftrieb brachte die Erfindung des Trommelankers durch einen Mitarbeiter

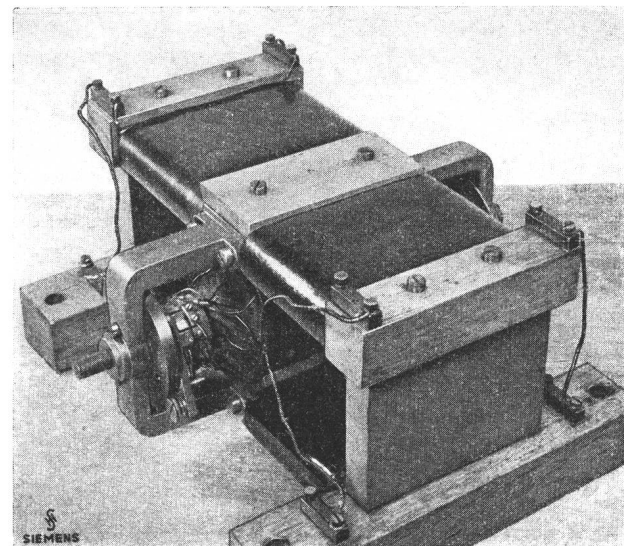


Fig. 5.
Erste Trommelankermaschine,
Original im Reichspostmuseum Berlin (1872).

Werner Siemens', v. Hefner-Altenneck, im Jahre 1872, der den Paccinottischen Ringanker insofern weiter ausbaute, als er die innern Drahtwindungen auf die Aussenfläche holte (Fig. 5). Bei solchen Maschinen wurde auch zum erstenmal eine Unter-

teilung des Ankereisens durchgeführt, indem der Körper aus Drähten hergestellt wurde. Dass man dabei noch nicht an die Erwärmung durch die Wirbelströme dachte, geht daraus hervor, dass Hefner-Alteneck zur Beseitigung der Ummagnetisierung auch eine Maschine angab, bei der das Ankereisen feststand und nur die Wicklung umlief (Fig. 6). Zur Unterteilung des Eisens in der rich-

liegender oder stehender Ausführung. Mit solchen als Hauptstrommaschinen geschalteten Motoren waren ausgerüstet die erste elektrische Eisenbahn der Welt auf der Berliner Gewerbeausstellung (1879), der erste elektrische Fahrstuhl (1880, Fig. 8) sowie die erste Strassenbahn (1881). Hierfür eigneten sich die mit ihrer Drehzahl von der Belastung abhängigen Maschinen besonders.

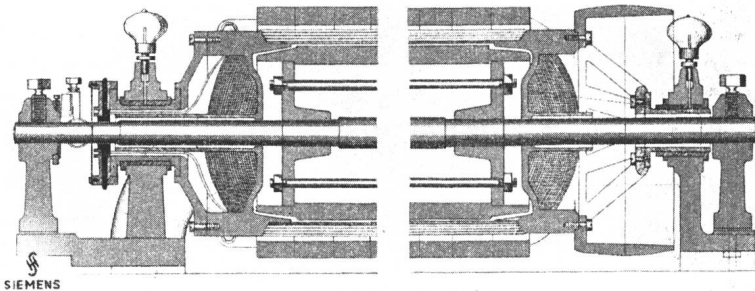


Fig. 6.

Maschine mit feststehendem Ankereisen
und umlaufender
Wicklung.

tigen Weise ist man erst in den 80er Jahren gekommen. Die Anker hatten noch sehr lange eine glatte Oberfläche, auf der die Wicklungen mit Bandagen aus Bindfäden oder Leder befestigt wurden. Zwar gab der Schwede Wenström schon 1882 den Nutenanker an, doch dauerte es bis in die 90er Jahre, ehe sich dieser Fortschritt allgemein durchsetzte. Die Kollektoren waren bei den Maschinen mit Doppel-T-Anker selbstverständlich nur zweiteilig gewesen, zumal bei dem Betrieb von Bogenlampen die Wellenform des Stroms keine Rolle spielte, auch verwendete man den Strom unkommutiert als Wechselstrom. Mit der Erfindung des Trommelankers wurden die Kommutatoren vielteiliger, und zwar bestanden sie zunächst aus 8, später aus 16, 24 und endlich 56 freitragend angeordneten Lamellen. Später wurde die Isolation aus Preßspan, Elfenbein und schliesslich Glimmer eingeführt.

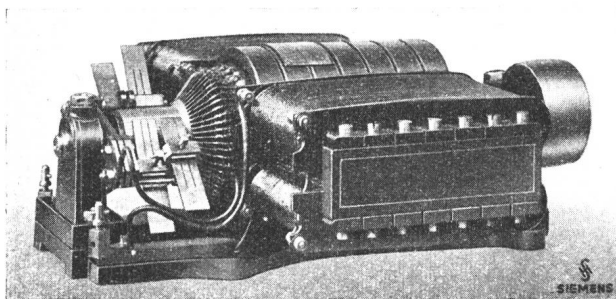


Fig. 7.

D-Maschine (seit 1876) in liegender Ausführung.

Der neuzeitliche Elektromotor ist nicht etwa aus den elektromagnetischen Maschinen der 30er und 40er Jahre hervorgegangen, sondern aus der Dynamomaschine, und zwar aus der mit Trommelanker versehenen. Sie wurden erst etwa 10 Jahre nach der Entdeckung des dynamoelektrischen Prinzips angewendet, und zwar als sog. D-Maschinen (Fig. 7) mit doppelt gebogenen Metallstäben in

Die Erfindung der Differentialbogenlampe (1878) und die Einführung der Glühlampe nach der Pariser Ausstellung von 1881, wo Edison die Kohlefadenlampe zeigte, rief den ersten Stromhunger hervor, der zur Errichtung kleiner, nur einen Häuserblock versorgender Kraftwerke führte. Für die in der Entwicklung dann folgenden ersten städtischen

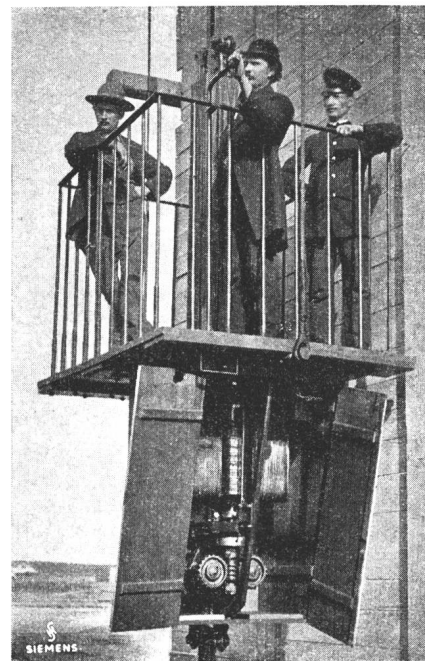


Fig. 8.

Fahrstuhl von 1880 mit D-Maschine als Antrieb.

Elektrizitätswerke mussten immer grössere Stromerzeuger für gleichbleibende Spannung, also in Nebenschluss-Schaltung, gebaut werden. Besonders durchgesetzt hat sich die Innenpolbauart von Siemens & Halske, die bis um die Jahrhundertwende beibehalten wurde und für Einheiten bis 1100 kW gebaut wurde (Fig. 9). Bei diesen Maschinen stand das Magnetfeld im Innern eines umlaufenden An-

kers fest, wodurch erreicht wurde, dass sämtliche Kraftlinien durch Leiter hindurchgingen und die

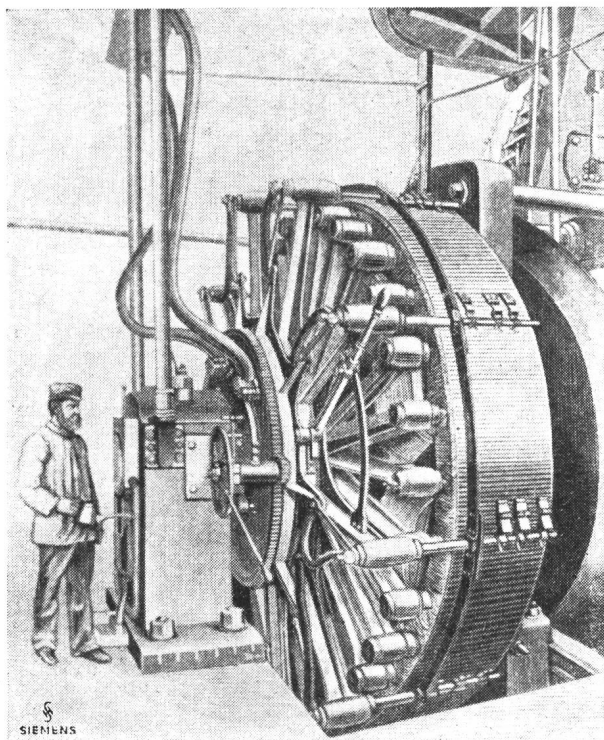


Fig. 9.

Innenpolmaschine von Siemens & Halske, seit 1886.

gefürchtete Streuung vermieden wurde. Gerade mit Rücksicht auf die Streuung entstanden zahlreiche Magnetformen, angefangen von den Hufeisenmaschinen bis zu ganz ausgefallenen Typen. Man muss dabei berücksichtigen, dass alle diese Maschinen rein gefühlsmässig konstruiert wurden, da die Gesetze vom magnetischen Kreis noch nicht beachtet wurden. Es galt als Glückssache, einen neuen Maschinentyp zu finden und man probierte mit den Wicklungen so lange herum, bis das gewünschte Ziel erreicht war. Eine Berechnung führten erst 1886 die Brüder Hopkinson ein, die Assistenten am Lehrstuhl Maxwells in Cambridge waren, und welche Theorien in einer für den praktisch tätigen Ingenieur brauchbaren Form brachten.

Man kann die Frühzeit der Entwicklung, die hier dargestellt werden sollte, als etwa mit dem Jahre 1891 abgeschlossen betrachten. In diesem Jahre fand in Frankfurt die Internationale Elektrotechnische Ausstellung statt²⁾, deren Vorbereitungen schon die Industrie aller Länder zu den grössten Anstrengungen veranlasst hatte. Sie brachte vor allem die Energieübertragung mit hochgespanntem Drehstrom und leitete damit die Entwicklung ein, die Werner Siemens vorgeschwebt hatte, nämlich, Energie von den Stätten ihres natürlichen Vorkommens zu den Stätten des Verbrauchs zu übertragen.

²⁾ Bull. SEV 1941, Nr. 18, S. 425.

Théorie de la formation de la foudre

Par Stanislaw Szpor, Winterthur

551.594.2

Les résultats des études expérimentales et théoriques de la formation de la foudre sont rappelés brièvement. Se basant sur les théories modernes des décharges, on discute le problème de la limitation du diamètre d'un canal. L'auteur considère ensuite le champ électrique d'après les données expérimentales et on mentionne le rôle des gouttes de pluie dans la formation de la foudre.

On cherche les relations entre différentes grandeurs: charge emmagasinée dans le canal préliminaire, intensité du champ électrique primaire et intensité maximum devant le front d'une flèche, longueur et diamètre du canal, courant de la décharge préliminaire et vitesse de propagation du front. Dans ce but, on commence par une étude purement électrostatique d'un canal conducteur qui met en court-circuit une voie dans un champ primaire uniforme. Les considérations sont ensuite généralisées pour un canal qui se développe avec un courant, une chute de tension et une force électromotrice de self-induction, ainsi que pour le cas d'un champ primaire non uniforme. Les résultats des calculs de la charge dans le canal préliminaire et du courant s'accordent assez bien avec les données expérimentales.

Il est montré que les chutes de tension lors du développement du canal peuvent provoquer une diminution du gradient devant le front après un maximum, ce qui est probablement la cause des arrêts des flèches dans la première décharge préliminaire d'un éclair. Dans la pause après l'arrêt d'une flèche, le front s'élargit fortement, mais le courant continue à transporter les charges dans le canal et affaiblit les chutes de tension, jusqu'à la formation d'une nouvelle flèche. L'influence de la polarité dans ce mécanisme est discutée. Plusieurs données expérimentales confirment la théorie.

Die Ergebnisse der experimentellen und theoretischen Studien über die Entwicklung des Blitzes werden kurz zusammengestellt. Nach einem Hinweis auf die moderne Theorie der Entladungen wird die Frage der Zusammenschnürung eines Funkenkanals betrachtet. Weiter wird das primäre elektrische Feld nach den experimentellen Angaben in Erwägung gezogen und die Rolle der Regentropfen besprochen.

Es werden die Beziehungen zwischen verschiedenen Grössen gesucht: Ladung im Vorentladungskanal, primäre Feldstärke und höchste Feldstärke vor der Stirn des Pfeiles, Länge und Durchmesser des Kanals, Strom der Vorentladung und Geschwindigkeit der Stirn. Zu diesem Zwecke beginnt man mit einer rein elektrostatischen Betrachtung eines leitenden Kanals, der eine Strecke eines gleichförmigen Feldes kurzschliesst. Weiter wird die Untersuchung für dynamische Verhältnisse eines wachsenden Kanals verallgemeinert, indem man den Strom, die Spannungsabfälle und die Selbstinduktion betrachtet. Auch der Fall eines ungleichförmigen primären Feldes wird geprüft. Die berechneten Werte der Ladung im Vorentladungskanal und des Stromes stimmen gut mit den experimentellen Ergebnissen überein.

Es wird gezeigt, dass die Spannungsabfälle während der Entwicklung des Kanals wahrscheinlich ein Sinken der Feldstärke vor der Stirn nach einem Höchstwert verursachen, was die Entwicklung eines Pfeiles in der ersten Vorentladung unterbricht. In der folgenden Pause wird die Stirn stark verbreitert, aber der Strom fliesst weiter im Kanal und bringt die Spannungsabfälle zum teilweisen Verschwinden, was die Bildung eines neuen Pfeiles hervorrufen kann. Der Einfluss der Polarität in diesem Spiel wird erörtert. Die Theorie wird durch verschiedene experimentelle Beobachtungen bestätigt.