

Badische Landesbibliothek Karlsruhe

Digitale Sammlung der Badischen Landesbibliothek Karlsruhe

Die unipolare Gleichstrommaschine

Ugrimoff, Boris von

Berlin, 1910

I. Die Entwicklung der Unipolarmaschine

[urn:nbn:de:bsz:31-274883](https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:31-274883)

Die unipolare Gleichstrommaschine.

Von Dipl.-Ing. Boris von Ugrimoff.

Einleitung.

Trotz der großen Erfolge, die der Schnellbetrieb, insbesondere durch Anwendung der Dampfturbine in den letzten Jahren auf sämtlichen Gebieten der Technik erzielt hat, ist es bis jetzt nicht gelungen, seine großen Vorteile auch dem Gleichstromgenerator zugeute kommen zu lassen. Denn bei den gegenwärtigen größeren Gleichstromgeneratoren ist es unthunlich, über eine Tourenzahl von 1500 bis 2000 hinauszugehen. — Selbstverständlich hat es an Versuchen, einen außerordentlich schnellaufenden Gleichstromgenerator zu bauen, nicht gefehlt, und einen solchen Versuch zur praktischen Lösung dieser Frage stellt die vorliegende Arbeit dar.

Das Interesse an diesem Problem wurde bei mir durch die Vorlesungen des Herrn Geheimen Hofrats Professor Dr.-Ing. E. Arnold im Jahre 1899 wachgerufen, der mir auch in liebenswürdigster Weise seine reiche Erfahrung bei der Ausführung der vorliegenden Arbeit zur Verfügung stellte und meine Versuche in jeder Hinsicht unterstützte, wofür ich mir erlaube, ihm an dieser Stelle meinen wärmsten Dank auszusprechen. Desgleichen möchte ich nicht versäumen, auch Herrn Professor N. Schukowsky und Herrn Professor E. Bolotoff von der technischen Hochschule zu Moskau für ihre bereitwillige Förderung meiner Arbeit verbindlichst zu danken.

Auch den Herren Ingenieuren W. Kogewnikoff und L. Segaloff, sowie Studiosus K. Schaenfer sage ich für ihre freundliche Mitarbeit meinen besten Dank.

I. Die Entwicklung der Unipolarmaschine.

Die bekannte Faradaysche Scheibe muß als erstes Experiment mit unipolarer Induktion anerkannt werden, und die dazu von Faraday verwendete, in Fig. 1 dargestellte Vorrichtung als erste unipolare Maschine.

Faraday ließ die Scheibe zwischen den Polen eines Hufeisenmagneten rotieren und drückte dabei je eine Kupferbürste an die Achse sowie an den Umfang derselben an. Es ließ sich sodann im Galvanometer g ein Strom konstatieren.

Aber schon bald hierauf¹⁾ konstruierte Faraday einen anderen Apparat, der Gleichstrom lieferte und in dem die unipolare Induktion viel vollkommener zur Geltung kam (Fig. 2).

Über dem Pol des Stahlmagneten $N-S$ befindet sich die Kupferscheibe D , die sich auf ein Spurlager im Zentrum des Poles N stützt. Ein Schleifkontakt a berührt den Umfang der Scheibe, ein anderer b das Zentrum derselben. Bei jeder relativen Bewegung von dem Magnet gegen die Scheibe konnte Faraday einen Strom im Galvanometer g wahrnehmen.

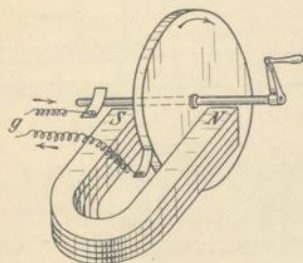


Fig. 1.

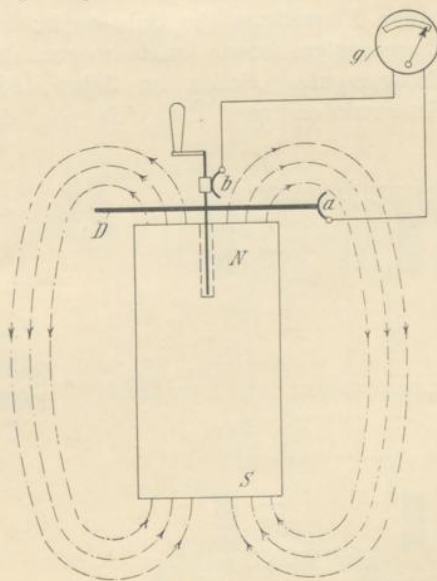


Fig. 2.

Nach Faraday hat eine ganze Reihe hervorragender Physiker, wie z. B. Hoppe, Edlund, Lecher, Hagenbach, Nobili, Antinori, W. Weber u. a., verschiedene interessante Apparate mit unipolarer Induktion gebaut.²⁾

Alle diese Versuche, mit Hilfe unipolarer Induktion Strom zu erzeugen, tragen jedoch den Charakter reiner physikalischer Experimente, ohne daß der Technik weitere Möglichkeiten erschlossen wurden, die unipolare Induktion auszunutzen.

Die ersten Versuche, eine Unipolarmaschine für Starkstrom zu bauen, fallen in die achtziger Jahre des vorigen Jahrhunderts. Un-

¹⁾ Faraday, Experimentaluntersuchungen über Elektrizität,

²⁾ Die elektromagnetische Rotation und die unipolare Induktion. Von Dr. Siegfried Valentiner.

gefähr im Jahre 1884 brachte George Forbes eine neue Unipolarmaschine in Vorschlag. Sie bestand aus zwei Scheiben, die auf einer gemeinsamen Achse zwischen den ringförmigen Polen zweier Elektromagnete rotierten. Der Aufbau dieser Maschine ist in Fig. 3 skizziert.

Diese Maschine besaß jedoch laut Zugeständnis des Erfinders einen großen Nachteil, Forbes konnte nämlich nicht den großen Axialdruck beseitigen, der in dem Halslager sehr große Reibung verursachte. Dieser Druck entstand wegen der nicht genügend genauen Einstellung der Scheibe in den Zwischenraum zwischen den Magnetpolen, sowie auch wegen der unzweckmäßigen Lage der Erregerspule. Schon im Jahre 1885 schlug Forbes eine neue Konstruktion vor, die sich von der vorhergehenden wesentlich

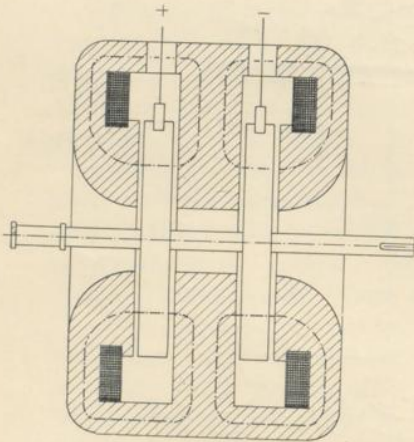


Fig. 3.

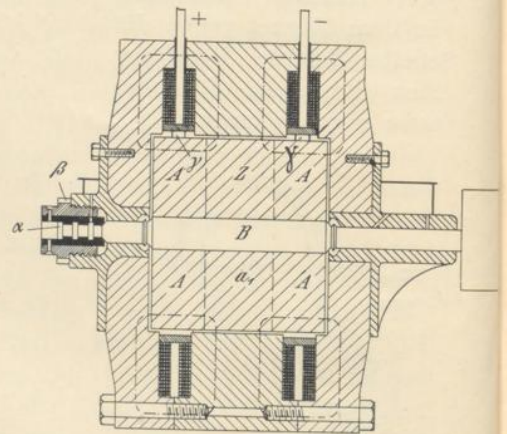


Fig. 4.

unterscheidet (D. R. P. Nr. 35188). In dieser Maschine wurde ein massiver Zylinder *Z* (Fig. 4) der Induktion unterworfen, der im Bereich zweier Kraftflüsse rotierte, deren Pfad durch die strichpunktierte Linie bezeichnet ist. Der Strom wird von der Trommel mittels der Bürsten γ abgenommen. Aber auch bei dieser Anordnung wurden bedeutende Axialdrücke beobachtet, zu deren Aufnahme Forbes das Kammlager α konstruierte. Dieses Lager war mit einer Vorrichtung β versehen, mit deren Hilfe man die Welle *B* mit dem Zylinder *Z* in axialer Richtung verschieben konnte, um dadurch den Lagerdruck zu vermindern.

Eigentümlicherweise betrachtet Forbes, nachdem er von den Scheiben zu der Trommel übergegangen, seine Maschine immer noch als aus zwei Scheiben „A“ bestehend (punktierte Linie), deren

Zwischenraum durch weiches Eisen ausgefüllt ist, das mit den Scheiben zusammen rotiert. Augenscheinlich stand bei Forbes der Grundgedanke über die Induktion in unzertrennlicher Verbindung mit den ursprünglichen Versuchen von Faraday und Arago. In seinen weiteren Bemühungen, den Axialdruck zu verringern, gelangte Forbes zu einer Konstruktion (Fig. 5), in der dieser Druck tatsächlich gänzlich beseitigt ist, da die Kraftlinien den Luftzwischenraum nur in radialer und nicht in axialer Richtung schneiden.

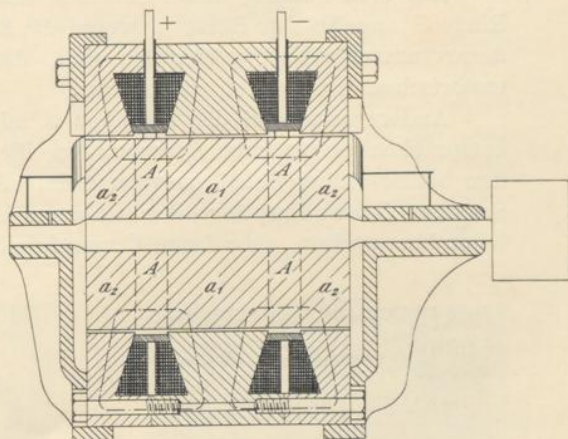


Fig. 5.

Aber auch diese Konstruktion sieht der Erfinder als aus zwei Scheiben bestehend an, bei denen nicht nur der Zwischenraum a_1 ,

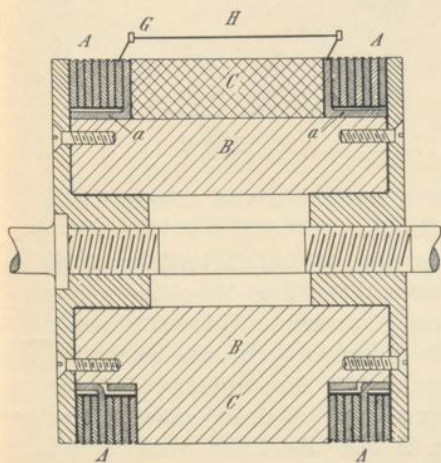


Fig. 6.

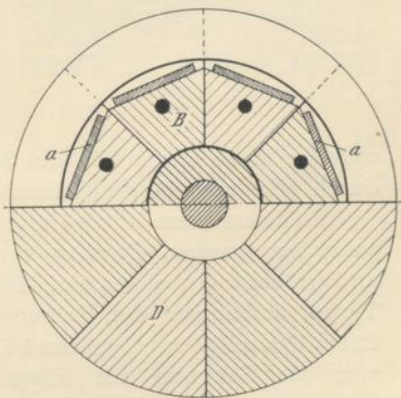


Fig. 7.

wie in der vorhergehenden Konstruktion, durch Eisen ausgefüllt ist, sondern auch der äußere Raum a_2 .

Der Weg des Kraftflusses ist in dieser Figur gleichfalls durch eine strichpunktierte Linie bezeichnet.

Zur Erzielung von größeren elektromotorischen Kräften wird bei dieser Konstruktion (Fig. 6 u. 7) eine große Anzahl eiserner Scheiben *A* angewandt, die voneinander isoliert sind.

Auf dem Umfang dieser Scheiben schleifen die an feststehende Ringe *G* angebrachte Bürsten, wobei die Ringe *G* durch Leitungen *H* derart untereinander verbunden sind, daß die induzierten elektromotorischen Kräfte sich summieren.

Andererseits sind die Scheiben *A* mit Hilfe von Zungen *a* mit entsprechenden Sektoren *B* verbunden, die die Verbindung zwischen den beiderseitigen Scheiben vermitteln. Forbes schlägt vor, diese Sektoren *B* aus Kupfer oder aus einem anderen guten Elektrizitätsleiter herzustellen. Der Raum *C* zwischen den Scheiben *A* wird durch

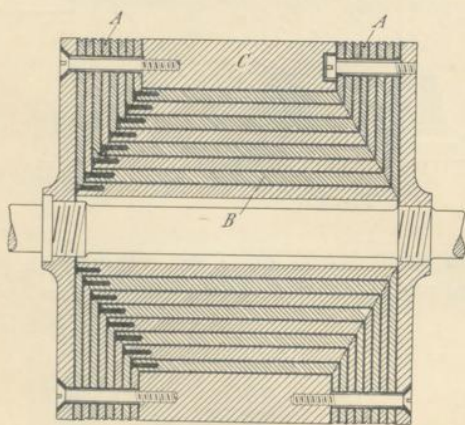


Fig. 8.

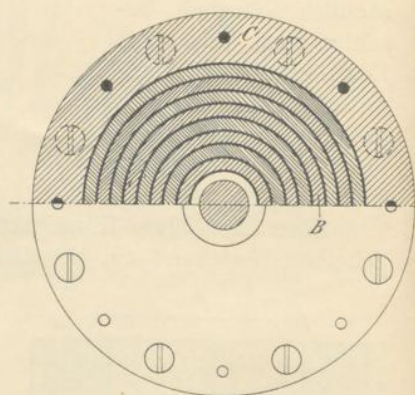


Fig. 9.

weiches Eisen ausgefüllt, die Sektoren *B* werden von diesem Eisen durch eine umgebende Schutzhülle isoliert.

In dieser Form ist die Unipolarmaschine gleichfalls im Jahre 1895 patentiert worden. Forbes vervollkommnete diese Maschine weiter und gelangte zu einem sich der reinen Trommelmaschine nähernden Typus, indem er den Sektoren die Form *D* gab, die auch den Raum *C* ausfüllten (Fig. 6 und 7 unten). Für diesen Fall schlägt er vor, die Sektoren aus Eisen herzustellen, jedoch schweigt er sich darüber aus, ob die Scheiben *A* hier die Rolle von Leitern übernehmen, in denen seiner Ansicht entsprechend auch ferner elektromotorische Kräfte induziert werden, oder ob der Vorgang der Induktion sich auf die Sektoren überträgt, wie es in Wirklichkeit stattfindet. Ein Schnitt durch den Anker einer solchen Maschine ist auf der unteren Hälfte der Fig. 6 und 7 dargestellt.

In demselben Jahre schlug Forbes eine Konstruktion des Ankers einer Unipolarmaschine vor, wie sie in Fig. 8 und 9 gezeichnet ist.

Die Sektoren *B* sind hier durch konzentrische Zylinder *B* ersetzt. Die Zylinder, sowie auch die Scheiben *A* sind voneinander isoliert und können alle aus Eisen hergestellt werden. Diese Maschine stellt wieder eine Kombination von Trommel- und Scheibenmaschinen vor.

Sehr nahe an den reinen Trommeltypus gelangte Forbes mit seiner Konstruktion, die in Fig. 10 und 11 dargestellt ist. Die Scheiben *A*, die in den ersten Konstruktionen bei Forbes die Hauptrolle spielten, sind zu ganz geringfügigen Massen zusammengeschumpft und dienen nur als Kontakttringe. Die Sektoren *B*,

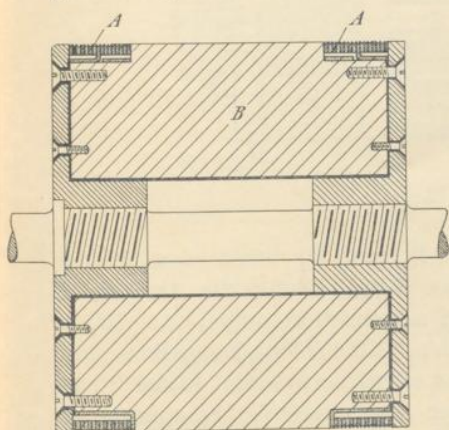


Fig. 10.

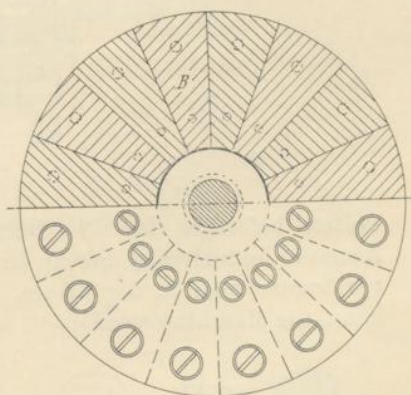


Fig. 11.

die früher nur die Rolle von Verbindungsleitungen zwischen den Scheiben spielten, erlangen die ihnen zukommende Bedeutung von der Induktion unterworfenen Leitern.

Einen vollständigen Begriff über die endgültige Form der Unipolarmaschine von Forbes gibt die Fig. 12 und 13. Die Maschine besitzt 50 Ringe *A*, 25 auf jeder Seite, wobei die entsprechenden Ringe durch Sektoren *B* verbunden sind. Diese Sektoren sind von verschiedener Länge in Abhängigkeit von der Lage der Ringe, die sie verbinden. Das Magnetgestell ist nach Art von Magnetgestellen der alten Gleichstrommaschinen von Gramme gebaut.

Wie weit die Befürchtungen von Forbes in Beziehung auf Axialdrücke gingen, ersieht man daraus, daß sogar in dem hier angeführten Falle, wo die Richtung des Kraftlinienflusses jede Möglichkeit der Entstehung von Axialdrücken ausschließt, dennoch ein Kammlager vorgesehen ist.

Prof. Arnold gibt im ersten Band seines Werkes: „Die Gleichstrommaschine“ die Zeichnung einer Unipolarmaschine (Fig. 14), die er im Jahre 1888 jedoch mit gußeiserner Trommel ausgeführt hat. Diese Maschine besteht aus einem Magnetgestell mit der Feldspule F . Der Verlauf des Kraftflusses ist durch eine punktierte Linie angedeutet. Im Luftschlitze rotiert die Armatur K , die aus einem Kupferzylinder besteht und auf dem Rande eines Rades mit

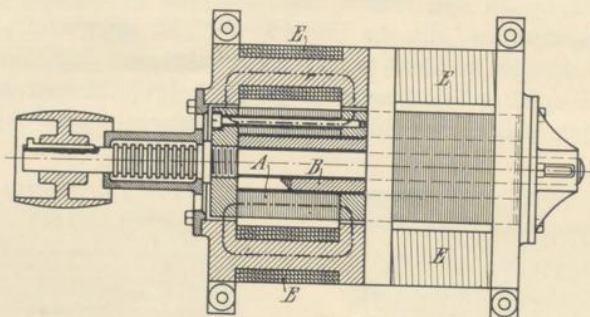


Fig. 12.

Bolzen befestigt ist. Die Bürsten B_1 und B_2 leiten den in der Armatur induzierten Strom in das Netz. Wenn die Armatur K verlängert wird in der Weise, wie es punktiert angedeutet ist, so kann die Maschine verdoppelt werden. Eine solche Doppelmaschine gibt entweder zweimal soviel Strom oder die zweifache Spannung als eine einfache Maschine. Die mittlere Bürste (in unserem Falle die Bürste B_2) wird bei einer Doppelmaschine im ersten Fall den ganzen Strom in das Netz führen, die linke (B_1) und die rechte (nicht aufgezeichnet) dagegen nur den halben Strom.

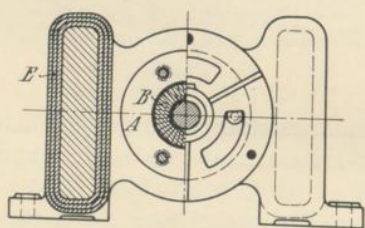


Fig. 13.

Im Jahre 1890 nahm Thury ein Patent auf eine Unipolarmaschine mit zwei Ankern, von denen der eine feststand und der andere beweglich war. In Fig. 15 ist die Maschine von Thury schematisch dargestellt.

In bezug auf die Erscheinungen der Induktion ist diese Maschine gleichwertig mit der oben beschriebenen von Arnold; die elektromotorische Kraft wird in dem rotierenden Zylinder d genau so induziert, wie es in der obigen Maschine der Fall war. Der unbewegliche „Anker“ dieser Maschine von Thury stellt einen Leiter

von zylindrischer Form d_1 dar, der isoliert und starr an der Oberfläche des Poles K befestigt ist und von Thury mit Unrecht als Anker bezeichnet wird, denn an demselben findet gar keine Induktion statt.

Der Zweck dieses unbeweglichen Ankers bestand nach Angabe von Thury darin, daß er der magnetischen Reaktion des beweglichen Ankers entgegenwirkte, so daß dieser zylindrische Leiter richtiger als Kompensationsleiter bezeichnet werden kann. (In der Sprache der nicht-unipolaren Maschinen ausgedrückt — Kompen-

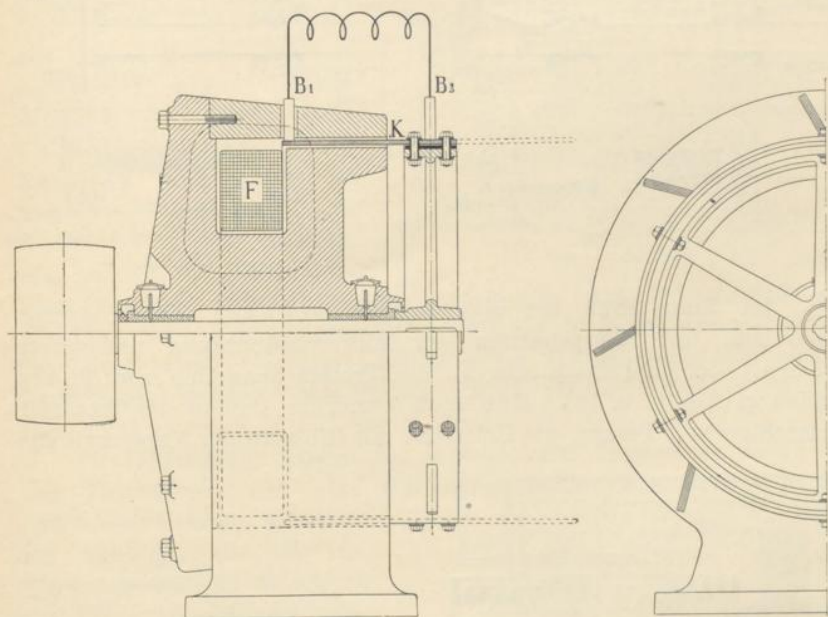


Fig. 14.

sationswicklung.) Tatsächlich wird der Strom, der im rotierenden Anker induziert wird, in der Richtung von rechts nach links, von der Bürste b' nach der Bürste b fließen und nach Passieren der Bürste b in den unbeweglichen Anker d_1 gelangen, wo er von links nach rechts der mit $+$ bezeichneten positiven Klemme zustreben wird. Auf diese Weise stellt der bewegliche Anker a mit dem zylindrischen Leiter d_1 sozusagen eine biflare Wicklung dar.

Dieselben Erwägungen in bezug auf Kompensation der Ankerückwirkung in der Scheiben-Unipolarmaschine führten Thury zu der in Fig. 16 dargestellten Konstruktion. Das biflare Prinzip ist hier in solcher Weise durchgeführt, daß, wenn in der rotierenden Scheibe d der in derselben induzierte Strom vom Zentrum zu

dem Umfang hin fließt, in der Scheibe d' , die parallel zu der rotierenden Scheibe d starr und isoliert befestigt ist, der Strom von der Bürste b , also vom Umfang nach dem Zentrum hin fließt.

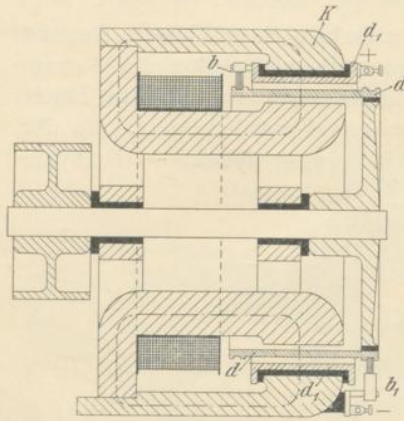


Fig. 15.

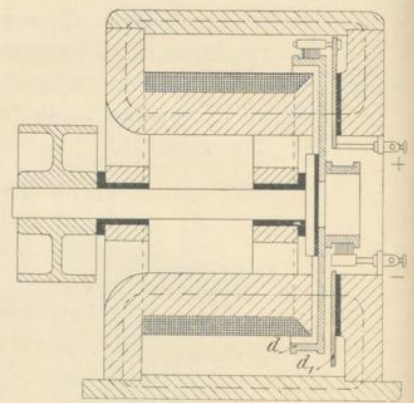


Fig. 16.

Im Jahre 1899 hat sich Julius Heubach eine Unipolarmaschine mit Kompensation der Ankerrückwirkung patentieren lassen, die im Prinzip sehr an die Trommelmaschine von Thury erinnert (Fig. 17 u. 18). Heubach bemerkte, daß in der Trommelmaschine von Thury die Bifilarität mit Hilfe zweier Kupferzylinder

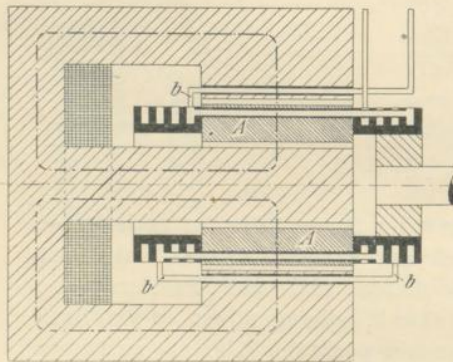


Fig. 17.

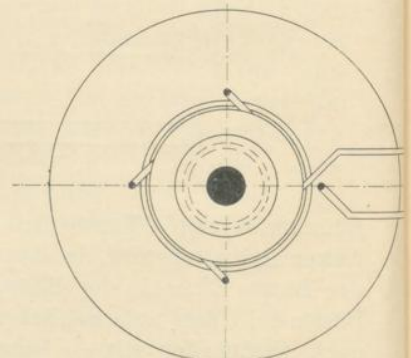


Fig. 18.

erreicht wird, wodurch der magnetische Widerstand des Kraftflusses stark vergrößert wird, besonders da der Kompensationszylinder vom Magnetgestell isoliert sein muß. Er schlug deshalb vor, sowohl den der Induktion unterworfenen Zylinder, als auch den kompensierenden durch in Eisen eingebettete Stabwicklungen zu ersetzen (Fig. 17

und 18). Die einzelnen Stäbe des mit der Welle rotierenden und der Induktion unterworfenen Systems A werden der Reihe nach vermittle Bürsten b mit den Stäben des ruhenden Kompensationssystems verbunden. Damit die Kompensation vollkommen wird, muß die Anzahl der Stäbe des Ankers sowie der Kompensationswicklung gleich sein, dann wird nämlich die magnetmotorische Kraft der Ankerwicklung in Gleichgewicht sein mit der magnetmotorischen Kraft der Kompensationswicklung.

Weiterhin erwägt Heubach die Möglichkeit, die Kompensationswicklung zu beiden Seiten des rotierenden Ankers unterzubringen.

Eine Maschine mit derartiger Anordnung der Kompensationswicklung ist in Fig. 19 abgebildet. Ferner schlägt Heubach vor, die kompensierte Unipolarmaschine unter Beibehaltung nur eines Kraftflusses doppelt auszuführen. Eine solche Maschine ist in Fig. 20 skizziert.

Im Jahre 1900 haben die schwedischen Ingenieure Zander und Ingeström sich eine Unipolarmaschine (Fig. 21a u. 21b)

patentieren lassen (D.R.P. Nr. 126307), die im allgemeinen an die Maschine von Arnold erinnert, jedoch die Gewinnung von erheblich höherer Spannung gestattet, da der rotierende Anker nicht aus einem massiven Zylinder, sondern aus mehreren Streifen A_1, A_2, A_3 besteht, die dem Mantel eines Zylinders entsprechend gebogen sind. In diesen

Streifen werden elektromotorische Kräfte induziert, die vermittle der Bürsten b und der Leiter γ in Serie hintereinander geschaltet werden. Zander und Ingeström beabsichtigten, ihre Maschine mit sehr großer Geschwindigkeit rotieren zu lassen und haben zu diesem Zweck eine Hälfte der Welle, auf der

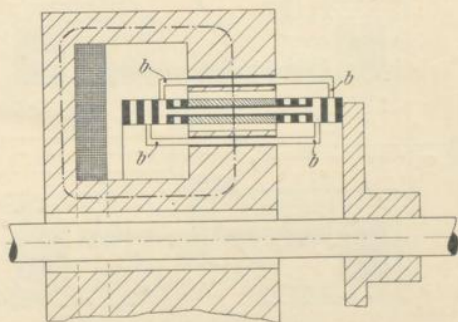


Fig. 19.

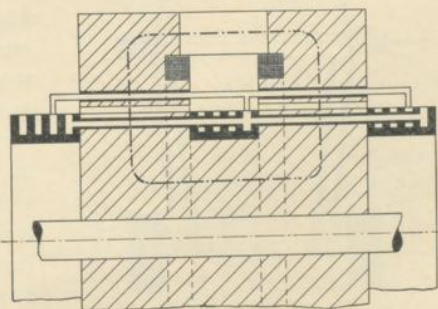


Fig. 20.

der Anker aufgekeilt ist, sehr schwach gestaltet, damit das ganze bewegliche System sich von selbst zentrisch einstellt, wie es

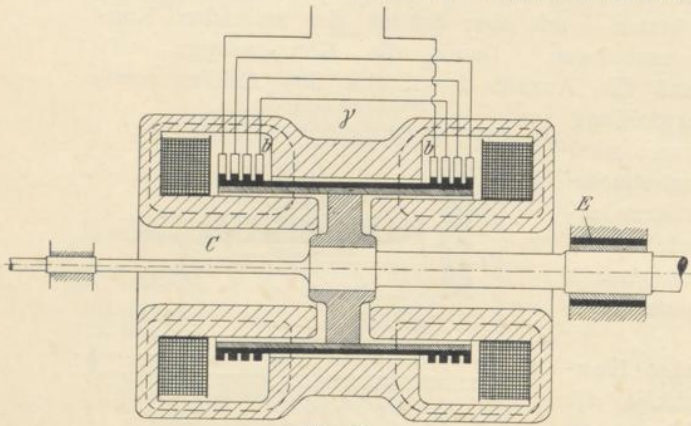


Fig. 21 a.

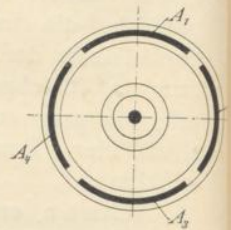


Fig. 21 b.

bei der de Laval-Turbine der Fall ist. Aus demselben Grunde haben die Konstrukteure das rechte Lager mit elastischem Kissen *E* versehen.

Eine höchst originelle Konstruktion einer Unipolarmaschine in Verbindung mit einer Dampfturbine hat im Jahre 1903 bis 1904 Beringer angegeben (D.R.P. Nr. 156092).¹⁾ (Fig. 22.)

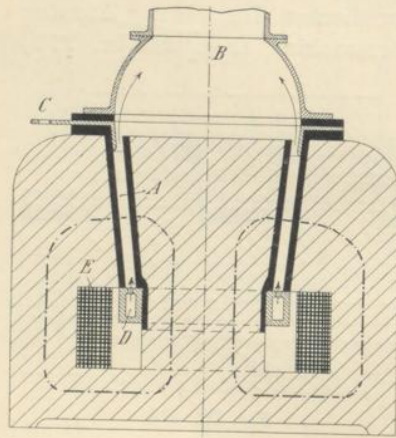


Fig. 22.

Der Leiter ist in diesem Falle flüssig und füllt die Aussparung *A* aus und wird durch Dampf in Bewegung gesetzt. Der Dampf tritt aus der Metalldüse *D* unter scharfem Winkel zu der Horizontalen in den Raum *A* und durch denselben in schraubenförmiger Richtung in den Abdampfkanal *B*. Dabei muß der Dampf durch den flüssigen Leiter hindurchströmen, er reißt denselben mit sich und bringt ihn so in eine rotierende Bewegung. Bei der Rotation des flüssigen Leiters im Kanal *A* um die vertikale Achse schneidet er den Kraftfluß, der durch die Wicklung *E* hervorgebracht wird. Dadurch wird in dem Leiter

¹⁾ O. Schulz, Unipolarmaschinen, S. 19.

eine elektromotorische Kraft induziert, die in dem Raum *A* von oben nach unten oder umgekehrt gerichtet ist. Selbstverständlich müssen die Wandungen des Kanals *A*, wie angedeutet ist, aus isolierendem Material bestehen.

Als Klemmen dienen in einem solchen Anker einerseits der metallische Behälter mit den Düsen *D*, der vom Magnetgestell isoliert ist, andererseits aber eine besonders geformte Flanscheinlage *C*.

Es fehlen Nachrichten darüber, ob Beringer sein Projekt ausgeführt hat, doch kann man schon auf den ersten Blick, trotz der scheinbaren Einfachheit, leicht manche Nachteile erkennen. So

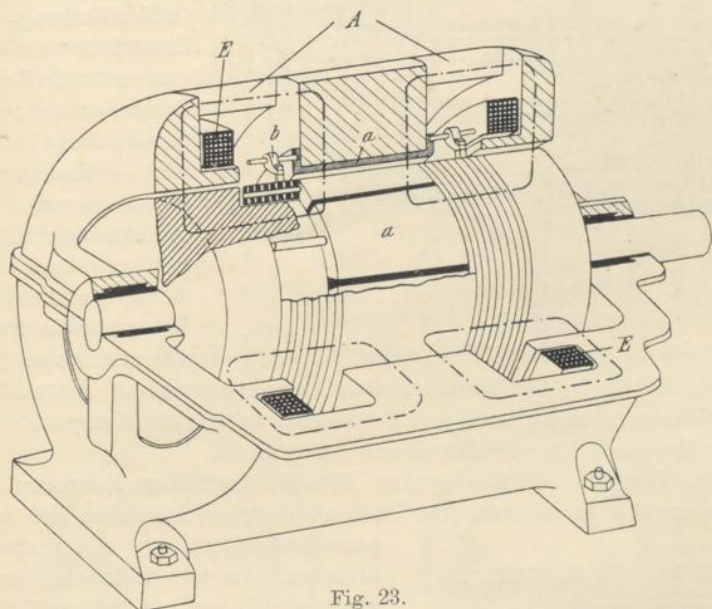


Fig. 23.

wird bei der enormen Geschwindigkeit, mit der der Dampf austritt — 800 bis 1200 m per Sekunde — die Reibung des flüssigen Leiters an den Gefäßwänden so groß werden, daß durch die hervorbrachte Wärme der Leiter verdampft werden muß. Außerdem wird der Umstand, daß der Auspuffdampf und die mit hohem Potential geladene Elektrode *C* in enge Berührung kommen, kaum eine Betriebssicherheit dieser Maschine sein.

Im Jahre 1905 hat Jakob Noegerrath sich eine Unipolarmaschine patentieren lassen (D. R. P. Nr. 169333), die besonderes Interesse verdient, da sie in größeren Einheiten (bis zu 2000 KW) durch die Firma „General Electric Co.“, Schenectady, ausgeführt worden ist.¹⁾

¹⁾ Proceedings of the American Institute of Electrical Engineers, Jan. 1905.

Die ursprüngliche Konstruktion dieser Maschine ist perspektivisch in Fig. 23 dargestellt.

Auf einem massiven Zylinder aus Eisen sind Stäbe *a* angebracht. Dieselben rotieren im Bereich des durch die Spule *E* erregten magnetischen Kraftflusses und sind beiderseits an entsprechende Schleifringe angeschlossen, auf denen die Bürsten *b* schleifen.

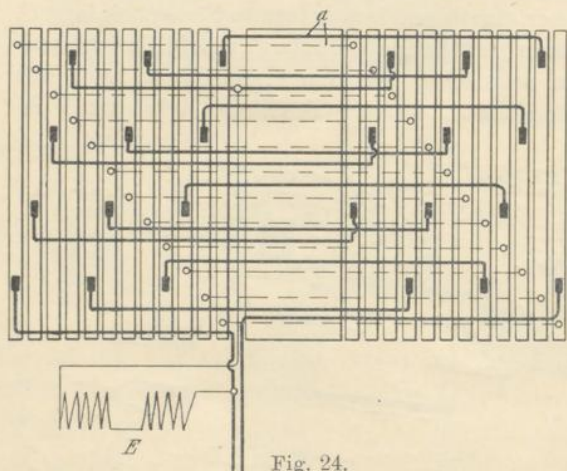


Fig. 24.

Diese Bürsten stehen mit den im Eisen des Magnetgestells eingebetteten Leitern *a* in Verbindung. Die Statorleiter *a* stellen einerseits die Verbindung der einzelnen Rotorleiter *a* in Serie her, andererseits kompensieren sie gleichzeitig die Rückwirkung des Ankers, denn wenn in den Leitern *a* die Ströme von rechts nach links fließen, treten in den Statorstäben *a* entgegengerichtete Ströme auf. Dem Wesen nach ist in diesem Konstruktionsteile die Kompensierung nach der Methode von Heubach ausgeführt.

In Fig. 24 ist die ganze Bewickelung der Maschine von Noegerrath in abgerolltem Zustand dargestellt, wobei die Kompensationsleiter *a* mit starken Strichen, die der Induktion unterworfenen Leiter *a* durch punktierte Linien bezeichnet sind. Die Erregerspule ist mit *E* bezeichnet.

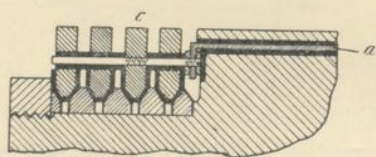


Fig. 25.

In den späteren Ausführungen hat Noegerrath die in Fig. 23 abgebildeten Streifen *a* durch in geschlossene Nuten verlegte Leiter ersetzt. In Fig. 25 ist ein Teil eines solchen Ankers mit der Konstruktion der Verbindung eines der Induktion unterworfenen Leiters mit den Schleifringen *C* dargestellt.

Die Erfahrung hat gezeigt, daß die in den Ringen *C* fließenden Ströme von großem Einfluß sind auf den von den Spulen *E* erregten Hauptkraftfluß, und zwar erweist sich diese Einwirkung als nicht konstant, sondern wechselnd in Abhängigkeit von der

Zeit. Eine solche periodisch wechselnde Einwirkung auf den ursprünglichen Kraftfluß würde sich sehr störend bemerkbar machen durch Erzeugung von Hysterisisverlusten in der Masse des ganzen magnetischen Eisens und besonders durch Hervorrufen von Wirbelströmen, wenn eine Kompensierung derselben nicht möglich wäre. Wenn nämlich einer der Ringe c , die in den Fig. 26 bis 29 dargestellt sind, sich in einer solchen Lage befindet, daß der mit diesem Ring verbundene Leiter a direkt unter der Bürste b steht, so wird der in a induzierte Strom unmittelbar in die Bürste b und weiter in den entsprechenden Kompensationsleiter gelangen. In diesem Falle fließt durch den Ring c gar kein Strom.



Fig. 26.

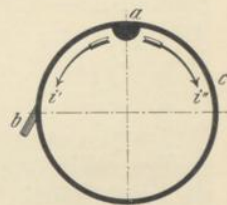


Fig. 27.

Wenn nun derselbe Ring c in die in Fig. 27 dargestellte Lage gelangt, die von der Lage in Fig. 26 um 90° verschieden ist, so wird der Strom aus dem Leiter a zur Bürste b über den Ring c in zwei parallelen Zweigströmen fließen. Der größere Teil des Stromes, i' , wird den kürzeren Weg wählen, der kleinere Teil, i'' , wird den längeren Pfad benutzen. Nach einer weiteren Vierteldrehung werden die

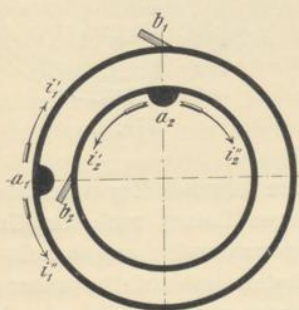


Fig. 28.

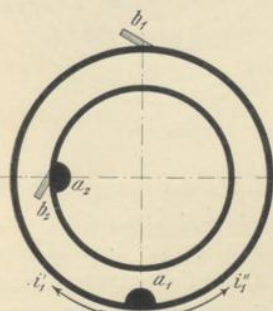


Fig. 29.

Ströme i' und i'' gleich werden, dreht sich der Ring noch weiter, so wird der Strom i'' anwachsen und der Strom i' kleiner werden, bis nach einer vollen Umdrehung, wenn der Leiter a wieder unter die Bürste b gelangt, der Strom i'' den vollen maximalen Wert erreicht und der Strom i' gleich Null wird. In dieser Stellung wird der Ring c wieder stromlos. Die Wirkung dieser Ströme i' und i'' kann man durch die Wirkung der benachbarten Ringe kompensieren. Tatsächlich finden wir, wenn wir auch nur zwei

dieser Ringe in Fig. 28 betrachten, an welchen die Leiter a_1 und a_2 unter einem Winkel von 90° befestigt sind, und deren Bürsten so angeordnet sind, wie es Fig. 28 zeigt, daß die Ströme i_1' und i_2' der Größe nach gleich sind, denn alle Leiter des Rotors sind in Serie geschaltet, der Richtung aber nach entgegengesetzt sind und demnach einander in magnetischer Hinsicht vollkommen kompensieren. — Ebenso kompensieren sich die Ströme i_1'' und i_2'' . Allerdings kann man bei einem Paar Ringe noch nicht die Verzerrung des Hauptfeldes vermeiden, die z. B. bei der in Fig. 29 dargestellten Lage der Leiter a_1 und a_2 , beobachtet wird, aber bei mehreren Ringpaaren kann man auch diese Erscheinung ganz durch Kompensation wegschaffen. — Hierbei muß man hinsichtlich der Anordnung der Befestigungsstellen von Leitern und Ringen

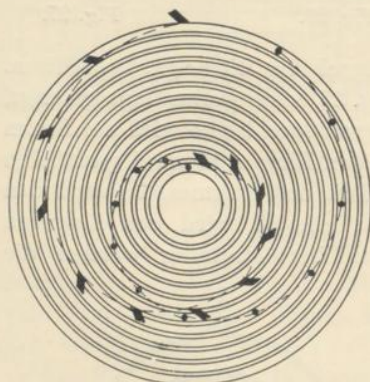


Fig. 30.

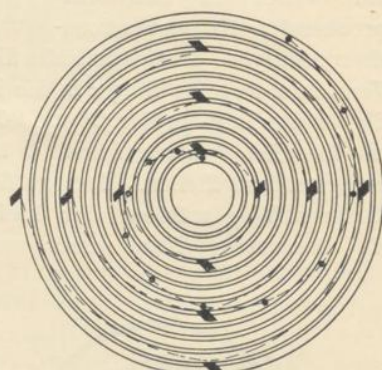


Fig. 31.

und der Lage der entsprechenden Bürsten folgende Regel beobachten: Wenn die der Induktion unterworfenen Leiter auf den Umfang des Ankers unter dem Winkel x gegeneinander angebracht sind, so müssen die entsprechenden Bürsten gleichfalls unter dem Winkel x , nur nach der entgegengesetzten Seite hin verschoben, angeordnet werden. — So sind z. B. in den Fig. 28 bis 29 die Leiter a_2 und a_1 gegeneinander um den Winkel $x = 90^\circ$, und zwar in einem dem Uhrzeiger entgegengesetzten Sinne verschoben, die Bürsten b_2 und b_1 gleichfalls um $x = 90^\circ$, aber im Sinne des Uhrzeigers.

Für einen Anker mit 12 der Induktion unterworfenen Leitern und 12 Ringen würde das Schema der Verbindungen der Leiter mit den Ringen (durch Kreise bezeichnet) und die Anordnung der Bürsten nach der oben ausgeführten Regel so ausfallen, wie es in Fig. 30 dargestellt ist.

Wie aus diesem Schema ersichtlich, bilden alle Verbindungsstellen zwischen Leitern und Ringen in diesem Falle eine Spirale; die Stellen, wo die Bürsten angebracht werden, eine zweite Spirale. (In Wirklichkeit werden es bei gleichem Durchmesser aller Ringe nicht Spiralen, sondern Schraubenlinien.) Jedoch ist eine solche Verteilung der Bürsten in der Ausführung unbequem, denn die Öffnungen (siehe Fig. 23) für die Besichtigung der Bürsten können nur an einigen bestimmten Stellen angebracht werden. — Deshalb schlägt Noegerrath vor, die Bürsten wohl nach einer Spirale anzuordnen, aber gegenseitig noch um einen Winkel von 90° zu verschieben. — Das Schema einer solchen Anordnung der Bürsten, die hinsichtlich der Besichtigung und Auswechselung derselben erhebliche Vorteile besitzt, ist in Fig. 31 dargestellt.¹⁾

Wie aus der Zeichnung ersichtlich ist, gruppieren sich die Bürsten in diesem Falle an vier Stellen des Umfangs der Ringe und folglich auch des Stators, von jeder Seite sind also je vier Öffnungen *A* vorzusehen. (Fig. 23.)

Fig. 32 zeigt die allgemeine Ansicht des Stators mit der Bürstenbrücke eines unipolaren Noegerrathschen Generators von 300 KW Leistung. Durch runde Öffnungen, deren je vier an jedem Ende des Stators angeordnet sind, ist die Möglichkeit gegeben, die unter diesen Öffnungen gruppierten Bürsten zu besichtigen.

In Fig. 33 ist die Hälfte des Stator-Magnetgestells eines größeren Generators (500 KW) dargestellt. In diesem Falle werden

¹⁾ Verhandlungen des Vereins zur Beförderung des Gewerbefleißes, Heft 8, 1908. „Praktisch brauchbare Unipolarmaschinen für höhere Spannungen von W. Wolf.“

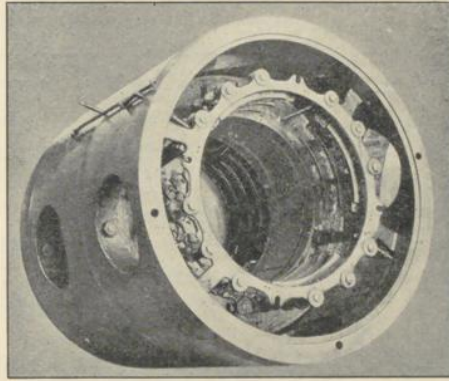


Fig. 32.

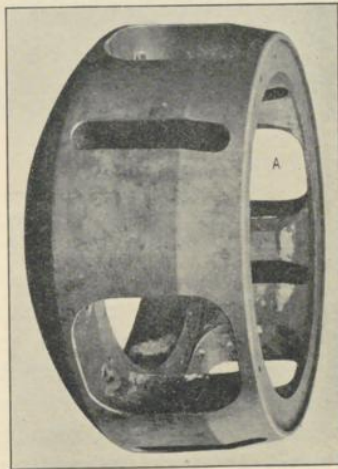


Fig. 33.

die Öffnungen *A* zur Besichtigung der Bürsten nicht rund, sondern rechteckig ausgeführt.

Damit die kühlende Luft leichter zu den Bürsten gelangen kann, werden im Gestell der großen Generatoren längliche Schlitz vorgesehen, durch die die Luft für die Bürsten angesaugt wird, um durch die großen Öffnungen *A* wieder zu entweichen.

Es ist leicht ersichtlich, daß die Maschinen von Noegerrath auch als raschlaufende Motoren, sowie als rotierende Spannungsteiler funktionieren können. — Tatsächlich kann die an den Enden jedes der der Induktion unterworfenen Leiter gewonnene Spannung von dem entsprechenden Ringpaare in das äußere Netz geleitet werden. — Ebenso kann bei den Maschinen von Noegerrath, wenn sie als Generatoren arbeiten, dem Spannungsabfall im Netz nicht nur durch Veränderung der Erregung entgegengewirkt

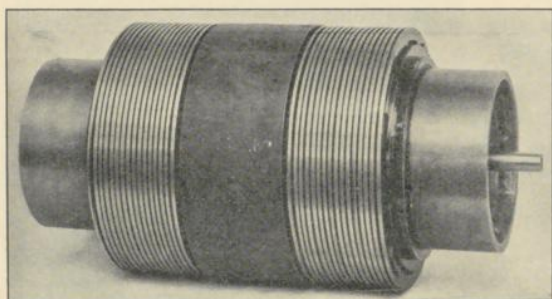


Fig. 34.

werden, sondern auch durch die Vergrößerung der Anzahl der der Induktion unterworfenen und in Serie geschalteten Rotorleiter. In Fig. 34 ist der Rotor eines solchen unipolaren Autotransformators für eine Spannung von 125 Volt dargestellt.

Nach Angabe von Noegerrath werden in jedem Leiter eines solchen Rotors 6,25 Volt induziert.

In großen Generatoren muß man zur Erzielung von hohen Spannungen eine große Anzahl von stromführenden Ringen verwenden, und ebenso eine große Anzahl von Bürsten. — Bei den enormen Umfangsgeschwindigkeiten (bis zu 125 m/sek), die Noegerrath für die Bürsten zuläßt, und bei dem hierbei unvermeidlichen starken Bürstendruck erwärmen sich die Bürsten und Ringe sehr stark und müssen spezielle Konstruktionen angewendet werden, um eine intensive Kühlung der Gleitkontakte zu erzielen.

In Fig. 35 ist eine solche bei großen Generatoren angewandte Konstruktion dargestellt. Unter die Ringe, auf denen die Bürsten schleifen, werden Stützen *A* angebracht, die stellenweise Ansätze *B* besitzen, deren Bestimmung es ist, den Axialdruck bei der Montage des ganzen Systems aufzunehmen. — Selbstverständlich werden die Stützen *A* wie auch die Ansätze *B* durch Zwischen-

lagen von dem Kern des Kollektors und voneinander isoliert, da sie elektrisch mit den entsprechenden Ringen C verbunden sind.

Durch Öffnungen K im Kern des Kollektors strömt die Kühlluft ein, die dann weiter an den Stützen A und Ansätzen B vorbeistreich und die Ringe C umspült und kühlt.

Bei kleineren Generatoren werden die Stützen für die (Fig. 36) stromsammelnden Ringe aus einer Reihe von Ringen C_1 hergestellt, zwischen denen durch Ansätze die stromsammelnden Ringe C eingeklemmt werden. Letztere werden zu diesem Zweck mit entsprechenden nach innen gerichteten Ansätzen versehen. Zwischen die Ansätze der Ringe C und C_1 wird eine solide Isolierschicht b eingefügt. — In den Ringen C werden Löcher d zur Aufnahme

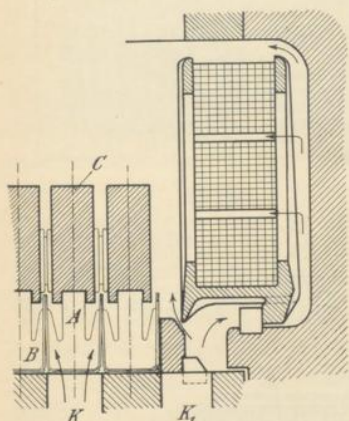


Fig. 35.

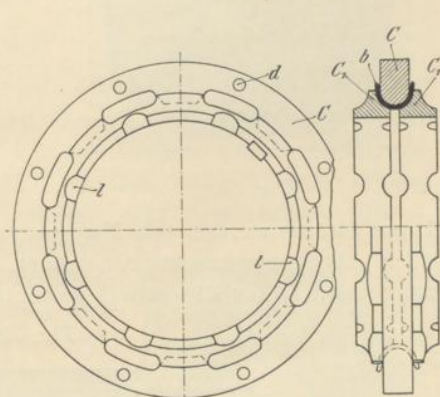


Fig. 36.

der der Induktion unterworfenen Leiter gebohrt, in den Ringen C_1 Löcher l zur Zuführung der Kühlluft. Ein solcher Kollektor, nur ohne die zugehörigen Leiter, ist in Fig. 37 in der Ansicht dargestellt.

In den neuesten Unipolargeneratoren von Noegerrath kann das Kollektorsystem von dem Rotorkörper zusammen mit der Hälfte (der Länge nach) der arbeitenden Leiter abgezogen werden, wie es in Fig. 38 dargestellt ist.

In diesem Falle wird der Rotor im ganzen so ausgebildet, wie in Fig. 39a gezeichnet ist; die Konstruktion eines aus zwei Teilen bestehenden Leiters ist aus Fig. 39b ersichtlich.

Die zur Kühlung der Ringe B (Fig. 39a) erforderliche Luft wird in axialer Richtung durch runde Öffnungen E in die zylindrische Kammer E eingeführt, von wo dieselbe durch radiale Kanäle zu dem Kollektorsystem geleitet wird. Um eine genügende Zufuhr

von Kühlluft sicher zu stellen, führt Noegerrath die Luft in die Kammer *G* in der Mitte des Rotors durch Kanäle, die im Inneren der Welle längs derselben gehen, wodurch nebenbei auch eine Verminderung der Wirbelströme in der Generatorwelle erzielt wird.

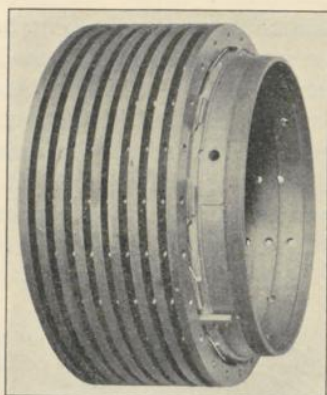


Fig. 37.

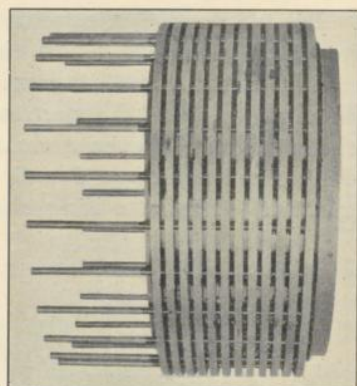


Fig. 38.

Diese Ströme werden von Noegerrath wohl als unbedeutend, aber doch als unerwünscht bezeichnet. — Damit die den Strom erzeugenden Leiter die radial gerichteten Kraftlinien schneiden, setzt

Fig. 39a.

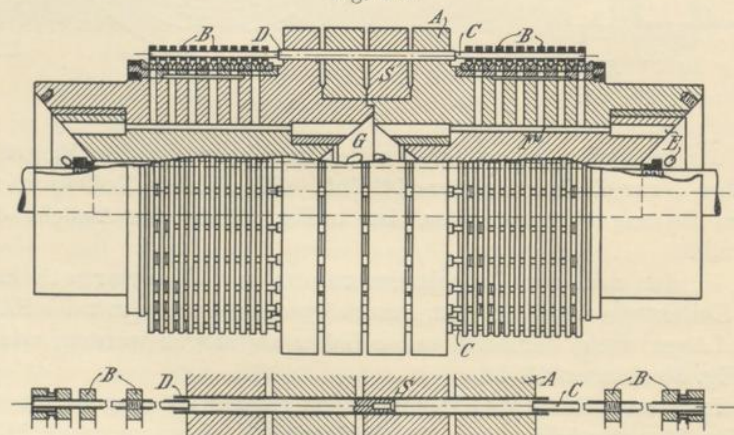


Fig. 39b.

Noegerrath in den letzten Konstruktionen die Mitte des Rotors aus mehreren Teilen zusammen. Dadurch wird gleichzeitig eine gleichmäßigere magnetische Induktion erzielt und werden die Ursachen vermieden, die einen Axialdruck hervorbringen können.

Solche Drücke sind augenscheinlich in den früheren Konstruktionen der Unipolarmaschinen von Noegerrath aufgetreten, und zwar infolge von ungleichem magnetischen Widerstand der linken und rechten Seite des Rotors (z. B. infolge von Gußfehlern). Wie aus der

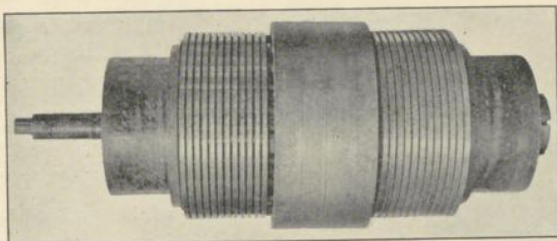


Fig. 40.

Zeichnung (Fig. 39 b) ersichtlich ist, werden die stromerzeugenden Leiter, die in axialer Richtung mit dem Kollektorsystem verschoben werden können, in der Mitte des Rotors einfach durch Ineinanderschieben der Enden *S* verbunden. Bei dem Anblick einer solchen Verbindung von Leitern, die gewöhnlich sehr starke Ströme führen, bis zu Tausenden von Ampere, kann man nicht umhin, den Wagemut des amerikanischen Erfinders anzustaunen, mit dem er sich für eine solche Konstruktion entschlossen hat. Doch hat die Praxis gezeigt, daß bei den enormen Zentrifugalkräften, die in den Rotoren von Noegerrath entstehen, die ungelötete Verbindung, durch die Fliehkraft innig zusammengedrückt, sich ebensogut bewährt wie eine gelötete, und dabei sehr wesentliche Vorteile bei der Demontierung des Kollektors bietet.

Noegerrath erwähnt nichts darüber, wie oft die Ringe des Kollektorsystems nachgedreht werden müssen, aber schon aus dem Umstand, daß dieser geniale Konstrukteur Geschwindigkeiten bis zu 125 m/sek verwendet, bis zu denen sich vor ihm noch niemand verstiegen hat, und aus der Bemerkung, daß die in seinem Generator verwendeten Metallbürsten sich innerhalb 24 Stunden um 80 mm abnutzen, kann man schließen, daß auch die Kollektorrings erheblichen Verschleiß aufweisen und öfter



Fig. 41.

als bei gewöhnlichen Turbogeneratoren ein Nachdrehen erforderlich machen.

Bei der Montage der fertigen Kollektorsysteme und der stromführenden Leiter werden die letzteren in isolierende Hüllen *D* eingeschoben, die ihrerseits im Rotorkörper eingebettet sind. — Eine Gesamtansicht des in Fig. 38 und 39 dargestellten Rotors zeigt Fig. 40.

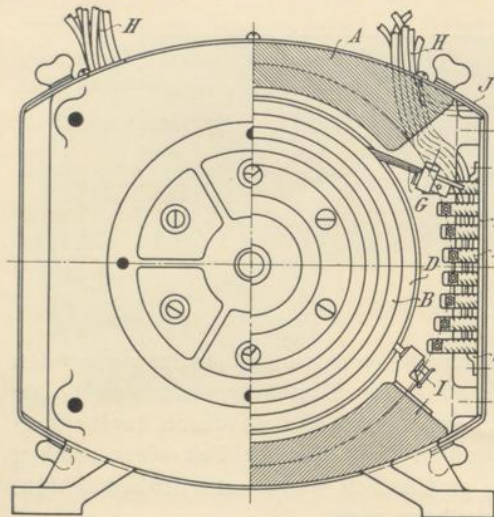


Fig. 42.

verteilt und in Form von großen Spulen ausgeführt, die auf Metallschablonen gewickelt sind. Gewöhnlich wird jede Spule der

Betreffs der Erregung ist zu bemerken, daß die Generatoren von Noegerath entweder als Nebenschlußmaschinen oder als Compoundmaschinen gebaut werden.

Zur Vermeidung von Axialdrücken werden die Amperewindungen der Erregung gleichförmig auf beide Seiten des Rotors

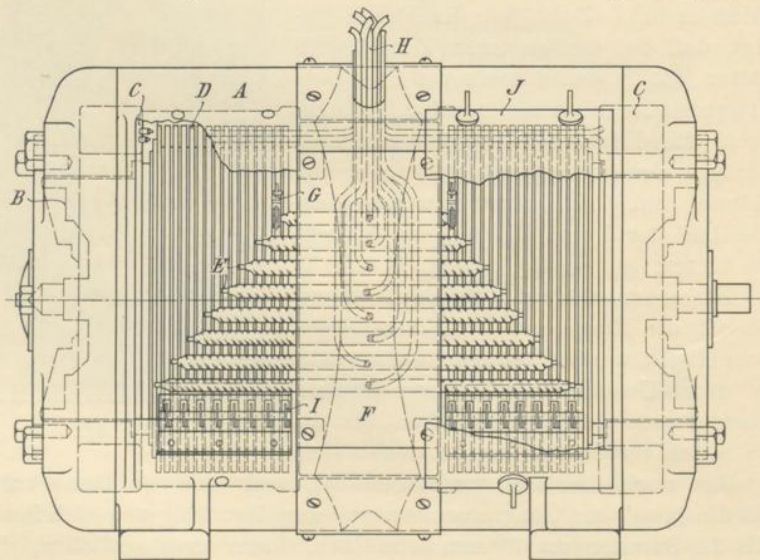


Fig. 43.

besseren Kühlung wegen aus mehreren einzelnen Spulen gebildet, zwischen denen die Luft durchströmen kann. In Fig. 35 ist eine solche aus drei Sektionen bestehende Wicklung dargestellt. Die

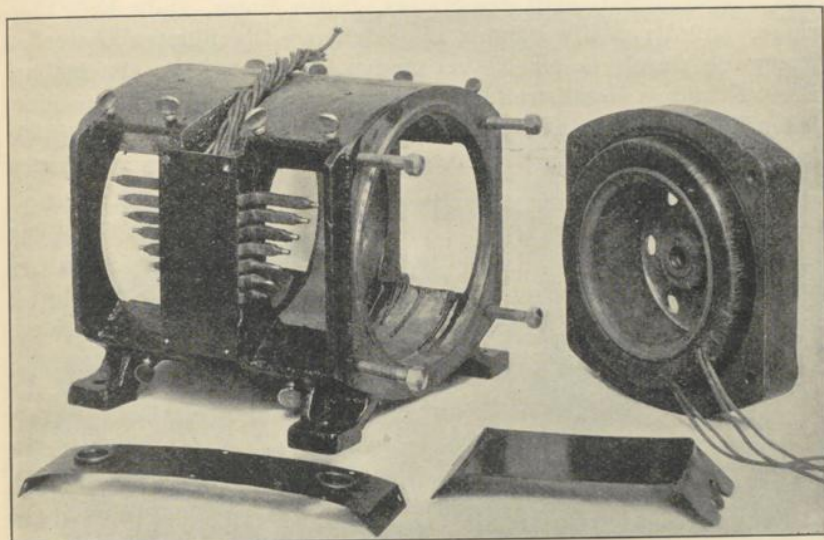


Fig. 44.

zwischen den einzelnen Spulen passierende Luft wird durch einen besonderen im Rotor befindlichen Ventilationskanal zugeführt. — Die Gesamtansicht einer Erregerspule für einen unipolaren Generator von Noegerrath von 2000 KW ist in Fig. 41 dargestellt.

Für kleine Maschinen hat Noegerrath im Jahre 1908 folgende interessante Konstruktion angegeben, die die Bürsten leicht sichtbar und zugänglich macht und außerdem verschiedene Kombinationen von Spannungen zuläßt.

In Fig. 42 ist eine Hälfte der Seitenansicht und eine Hälfte des Durchschnittes gezeigt, in Fig. 43 eine Seitenansicht mit teilweise entfernten Schutzblechen, die aus Eisen bestehen und das Bürstensystem verdecken; in Fig. 44 die allgemeine Ansicht des Autotransformators ohne Rotor und mit abgenommenen Bürstenhaltern. Der Rotor der Maschine ist separat in Fig. 34 dargestellt.

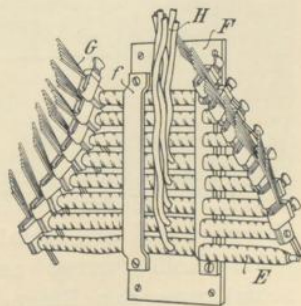


Fig. 45.

In Fig. 45 ist das Klemmbrett abgebildet, an dem die Leiter befestigt sind, die die Bürstenpaare verbinden. Das Prinzip,

die Ankerreaktion durch Anordnung dieser Leiter in der Nähe der Rotoroberfläche zu kompensieren, ist in diesem Falle von Noegerrath nicht angewendet worden. — In Fig. 42 bezeichnet *A* das in Stahlguß ausgeführte Gestell des Stators, *B* den Rotor, *D* die Kollektoringe, auf denen die Bürsten *G* schleifen. Die Bürsten *G* werden paarweise durch Leiter *E* verbunden, die an das abnehmbare Brett *F* mittels Metallstreifen *f* befestigt sind. Von der Mitte eines jeden Leiters geht ein biegsames Kabel *H* ab, wodurch die Möglichkeit gegeben ist, die in den einzelnen Leitern des Rotors induzierten

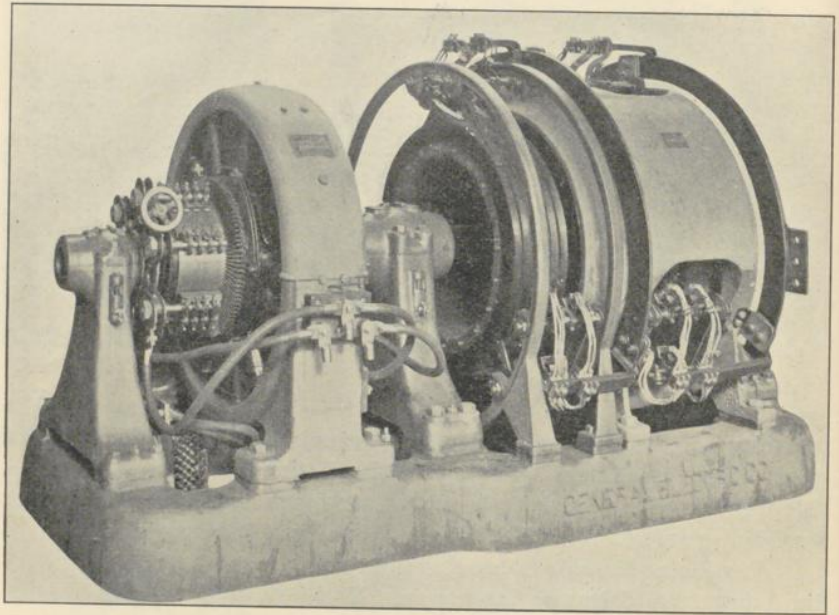


Fig. 46.

Spannungen außerhalb der Maschine auf verschiedene Weise zu kombinieren. Die den Strom abnehmenden Bürsten bestehen sowohl in dieser, als auch bei den anderen Konstruktionen von Noegerrath aus Metall. — Jedoch empfiehlt Noegerrath für jeden Kollektoring noch eine besondere Graphitbürste *I* zur Schmierung der Ringe vorzusehen, wodurch ohne Vergrößerung des Übergangswiderstandes der Gleitkontakte die Reibungsarbeit vermindert wird. In Fig. 43 sind mit *C* die Stellen bezeichnet, wo sich die Erregerspulen befinden und mit *B* (punktiert) die Konturen des Rotors.

In Fig. 45 ist das abnehmbare Brett *F* mit den auf demselben befestigten Leitern *E* und *H* und den Bürsten *G* separat dargestellt.

Die Maschinen von Noegerrath haben in Amerika eine sehr verschiedene Verwendung gefunden. So ist in Fig. 46 ein Motor-generator dargestellt. Er besteht aus einem gewöhnlichen Gleichstrom-Kollektormotor mit Wendepolen von 1200 Umdr. i. d. Min. und einem mit diesem unmittelbar gekuppelten Generator von 6 Volt Spannung bei 8000 Ampere Stromstärke. Der Generator liefert Strom für elektrolytische Zwecke.

In Fig. 47 ist ein Noegerrath-scher Unipolar-Generator von 300 KW Leistung dargestellt.¹⁾ Es ist dieses der erste Generator von Noegerrath, mit dem er die Experimente ausführte, von deren Resultat das weitere Schicksal seiner Konstruktionen abhing. Der Rotor dieser Maschine besaß 24 der Induktion unterworfenen Leiter, die an 2×24 Ringen befestigt waren, je 24 an jeder Seite des Rotors. Die Leiter haben auf der Oberfläche des Rotors die Form flacher Bleche und gehen in der Gegend der Kollektoringe in runde Stangen über, so daß die wirkliche Ausführung des Rotors dieses Generators an die im Schema Fig. 23 dargestellte Konstruktion erinnert. Die flachen Teile der Rotorleiter sind nicht genau an die zylindrische Oberfläche des Rotors angepaßt, sondern etwas geneigt zu ihr ausgeführt, nach Art der Flügel von Ventilatoren, wodurch augenscheinlich die Ventilation des Generators verstärkt wird. Über diese Leiter ist eine Bandage aus Stahldraht angebracht. Noegerrath nimmt an, daß man durch eine gleichförmige Verteilung des stromführenden Kupfers über die ganze Oberfläche des Rotors eine erhebliche Verminderung der Ankerreaktion erzielen kann, da eine solche Konstruktion einen großen Luftzwischenraum im Gefolge hat.

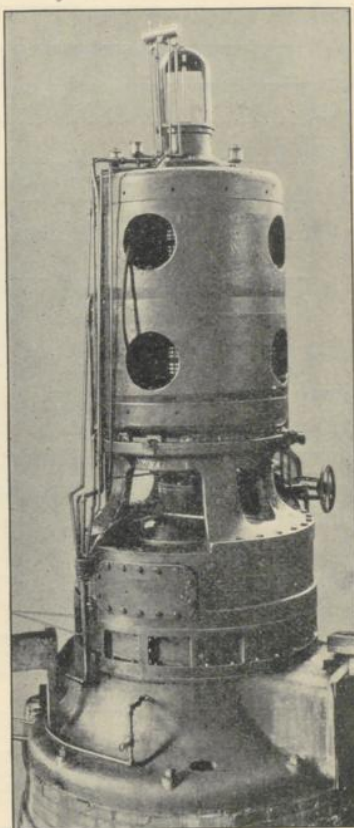


Fig. 47.

¹⁾ Proceedings of the American Institute of Electrical Engineers, Nr. 1, 1905.

Das System der unbeweglichen Leiter, die die Ankerrückwirkung kompensieren, besteht in diesem Falle aus 12 Kabeln.

In Fig. 48 sind die Verluste in dem erwähnten Generator durch Kurven dargestellt; die Kurve I stellt die Veränderung aller Verluste in Abhängigkeit von der Tourenzahl dar, die Kurve II die Reibungsverluste und die Kurve III die Erwärmung der Kollektor-

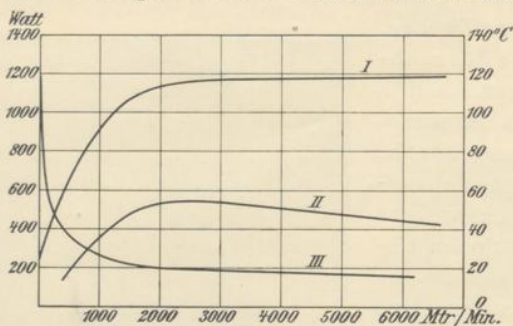


Fig. 48.

ringe. Die Ringe waren aus Stahl, die Schleifbürsten aus Kupfer. In Fig. 49 ist die Kurve des Wirkungsgrades eines Generators von 300 KW dargestellt, aus der man ersehen kann, daß der Wirkungsgrad einer Unipolarmaschine sich wenig von dem Wirkungsgrad gewöhnlicher Kollektormaschinen unterscheidet.¹⁾ Die Jouleschen Verluste des Erregerstromes sind nach Angaben von Noegerrath geringer als die entsprechenden Verluste in Kollektormaschinen, da der gesamte magnetische Widerstand des Kraftlinienflusses geringer ist.

Die Verluste an Stromwärme im Rotor sind minimal infolge der verhältnismäßig geringen Länge der Rotorleiter. — Wenn man die Konstruktion eines solchen Generators vom rein theoretischen Standpunkt betrachtet, so könnte man annehmen, daß Verluste

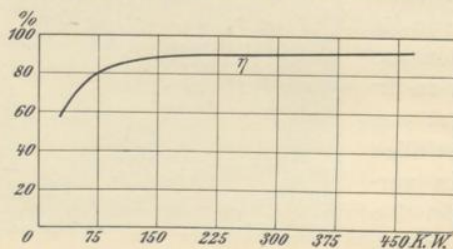


Fig. 49.

durch Hysterisis und durch Foucault-Ströme überhaupt nicht auftreten, doch stellt sich heraus, daß Verluste durch Wirbelströme und Hysterisis, wenn auch nur von ganz unbedeutender Größe, dennoch auftreten, da einerseits der Stahlguß nie ganz gleichartig ausfällt, und andererseits doch eine Ankerrückwirkung stattfindet, durch die das ursprüngliche Magnetfeld stellenweise abgeschwächt und anderorts wieder verstärkt wird. Auch gibt die Gestaltung der der Induktion unterworfenen Leiter (in Form von flachen Streifen) Anlaß zur Vermutung, daß in denselben Wirbelströme entstehen.

¹⁾ Elektrotechnischer Anzeiger Nr. 103, S. 1141.

Wenn wir das Diagramm in Fig. 48 betrachten, so muß uns die sonderbare Erscheinung auffallen, daß mit dem Anwachsen der Umfangsgeschwindigkeit die Reibungsverluste zuerst ansteigen und dann allmählich wieder kleiner werden (Kurve II). Auch ist der Einfluß der Ventilation auf die Temperatur der Ringe in Abhängigkeit von der Tourenzahl sehr interessant. Was nun die Stromdichte in den Gleitkontakten betrifft, so betont Noegerrath, daß in den Schleifringen, wie es schon Professor E. Arnold in seinem Werke „Die Gleichstrommaschine“, Bd. I, S. 333, veröffentlicht hat, mit der Vergrößerung der Stromdichte der scheinbare Übergangswiderstand der Schleifkontakte geringer wird.

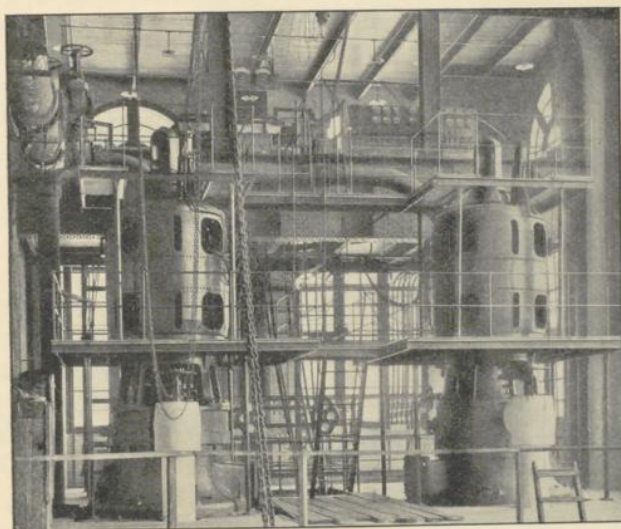


Fig. 50.

Betreffs des Bürstendruckes äußert sich Noegerrath, daß eine Vergrößerung desselben keine erhebliche Verminderung des Übergangswiderstandes zur Folge hat und nur dazu dient, die Entstehung von Funken zu vermeiden, die bei großen Geschwindigkeiten und schwachem Druck durch Vibration der Bürsten entstehen könnten.

Sehr interessant ist noch außerdem, daß ein solcher Generator gegen Kurzschlüsse und momentane Überlastungen sehr wenig empfindlich ist. — Da eine Kommutierung des Stromes wegfällt, verschwindet ein Teil der gefahrbringenden Erscheinungen, die infolge von Kurzschlüssen auftreten, dem anderen Teil, nämlich der Erwärmung der Leiter und ihrer Deformation, wird durch die all-

gemeine energische Kühlung der ganzen Maschine entgegengewirkt. Die Dauer von Kurzschlußströmen pflegt für gewöhnlich nur kurz zu sein, und in dieser Zeit können sich die kräftig ventilierten Bewickelungen nicht bis zu einer gefährlichen Temperatur erwärmen. Versuche haben gezeigt, daß momentane Überlastungen bis 200% und mehr keinen schädlichen Einfluß auf den Generator hervorbrachten. Diese Eigentümlichkeit der Unipolarmaschinen macht sie besonders brauchbar zur Energieabgabe an Bahnmotoren und Hebewerke.

Fig. 50 stellt einen Teil einer elektrischen Zentrale dar, die mit Unipolarmaschinen von Noegerrath ausgerüstet ist. Diese Generatoren arbeiten parallel auf ein Dreileiternetz von 200×300 Volt. Je 300 Volt werden aus jeder Hälfte der induzierten

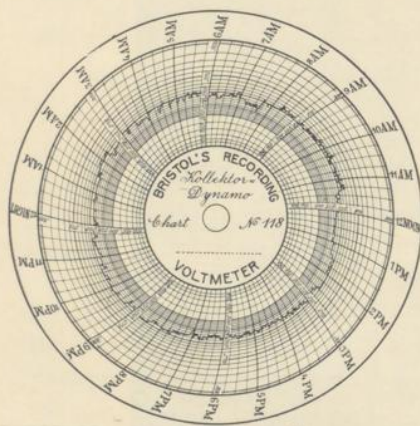


Fig. 51.

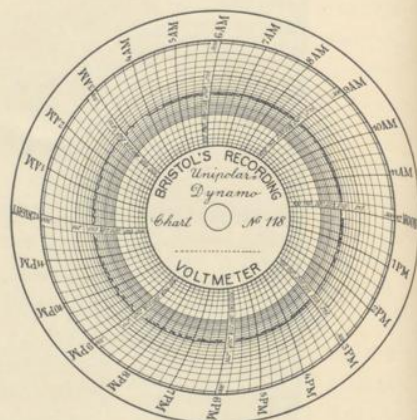


Fig. 52.

Leiter (der der Induktion unterworfenen Leiter) des Rotors entnommen, ohne daß irgendwelche zusätzliche Vorrichtungen zur Teilung der Spannung, wie z. B. die von Dilovo-Dobrowolski, erforderlich sind. Diese Generatoren liefern Strom für Beleuchtung und für Kranmotore; sie leisten je 500 KW. Besonderes Interesse besitzt der Umstand, daß auf der beschriebenen Station auch Kollektormaschinen vorhanden sind, die für dasselbe Netzstrom geliefert haben.¹⁾ Durch liebenswürdiges Entgegenkommen von Noegerrath ist es dem Autor ermöglicht worden, Originalabzüge von Diagrammen der Netzspannung zu erhalten, sowohl während des Betriebes von Kollektormaschinen, wie auch von Unipolarmaschinen. — In beiden Fällen hatten die Generatoren Nebenschlußerregung, auch waren die Verhältnisse bezüglich Regulierung und Belastung gleichartig.

¹⁾ Electrical World, Vol. 52, Nr. 2. September 1908.

In Fig. 51 und 52 sind die Spannungsdiagramme für Kollektormaschinen und für Unipolarmaschinen dargestellt. Die bessere Regulierung der Spannung der Unipolarmaschinen bei plötzlichen Spannungsänderungen ist auffällig und erklärt sich durch die größere Geschwindigkeit der Generatoren und deren größere Massen.

In letzter Zeit hat General Electric Co. einen Generator von 2000 KW Leistung (Fig. 53) bei verschiedener Spannung gebaut, und zwar bei 200, 300 und 600 Volt. Der Generator besitzt 96 Bürsten, also 48 der Induktion unterworfenen Leiter, die zur Erzielung von 600 Volt alle hintereinander geschaltet werden. In jedem Leiter werden folglich 12,5 Volt induziert.

Nach den ersten Erfolgen von Noegerath hat eine ganze Reihe von Elektrotechnikern sich der Frage der Unipolarmaschinen zugewandt, und können wir folgende Konstruktionen als Ergebnis ihrer Arbeiten verzeichnen:

Im Jahre 1905 hat W. Mathiesen eine sehr originelle Konstruktion einer Scheiben-Unipolarmaschine zum Patent angemeldet, die in Fig. 54 dargestellt ist. Mathiesen hat ganz richtig vermutet, daß eine Hauptschwierigkeit bei der Konstruktion der schnelllaufenden Unipolarmaschinen in der heikelen Stromabnahme an dem Umfang besteht, also an einer Stelle, wo die Geschwindigkeit am größten ist. — Sogar ein sehr erheblicher Druck auf die Bürsten schließt nicht die Möglichkeit aus, daß bei einer Vibration der Bürsten Funken entstehen. — Auf der Annahme basierend, daß diese Vibrationen infolge von schnell aufeinander folgenden Stößen auftreten, die von der Scheibe auf die Bürsten über-

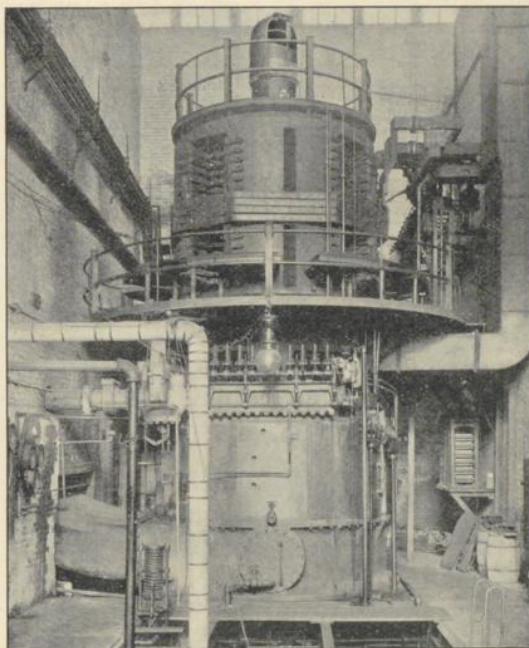


Fig. 53.

tragen werden, schlug Mathiesen vor, den Rotor des Generators an einem kugelförmigen Gelenk aufzuhängen und das untere Ende der Welle ganz frei zu belassen. Die der Induktion unterworfenen Scheiben d und d_1 werden auch nach einer Kugelfläche bearbeitet, deren Mittelpunkt im Punkt b sich befindet.

Bei dieser Anordnung treten im raschlaufenden Rotor die Erscheinungen des Gyroskopes auf, er zentriert sich automatisch und läuft vollkommen stoßfrei.

Um höhere Spannungen zu erzielen, schlägt Mathiesen vor, an einem Kugelgelenk Rotoren von zylindrischer Form aufzuhängen, ähnlich wie die von Noegerrath. In diesem Falle wird das untere Ende der Welle zur Aufnahme von event. möglichen, durch Gußfehler hervorgerufenen Seitenkräften in eine besondere Führungshülse A (Fig. 55) befestigt.

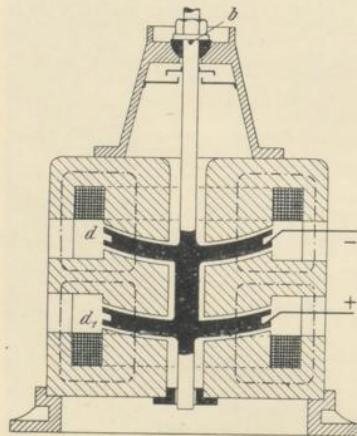


Fig. 54.

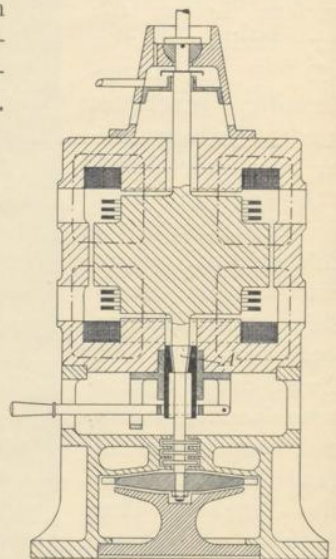


Fig. 55.

Das Laufrad der Dampfturbine wird hierbei direkt auf der Verlängerung der Rotorwelle aufgesetzt.

Ungefähr um dieselbe Zeit schlug P. Steinmetz¹⁾ die in Fig. 56 und 57 dargestellte Konstruktion einer Unipolarmaschine vor. Der Rotor A des Generators von Steinmetz erinnert im allgemeinen an den Rotor von Noegerrath, der durch die Spule E hervorbrachte induzierende Kraftlinienfluß des Stators wird durch die gleichnamigen radial angeordneten Magnetpole direkt an den Umfang des Rotors geleitet. — Diese Pole werden an das Magnetgestell des Stators G mit den Schrauben b befestigt. Steinmetz

¹⁾ Electrical World, New-York, Vol. 46, S. 913.

nimmt an, daß hierbei der Kraftfluß, der die Oberfläche des Rotors durchdringt, sich vollkommen gleichmäßig auf die ganze Oberfläche des Rotors verteilt.

Die Bürsten B und B_1 werden, wie auch bei Noegerrath, in Serie miteinander verbunden, wobei von den zwei äußersten

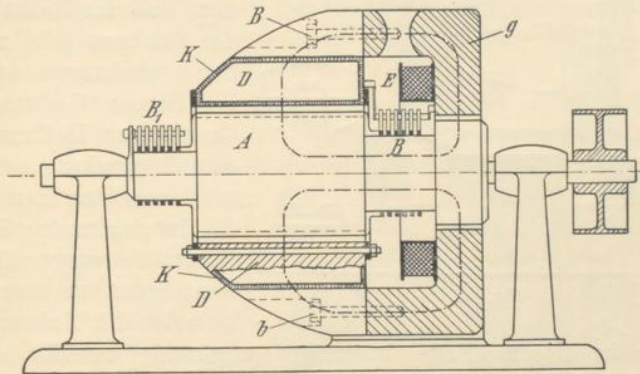


Fig. 56.

Bürsten ein Teil des Stromes durch einen die Erregung regulierenden Widerstand in die Spule E geleitet wird.

Durch die Ankerrückwirkung wird ein mit dem Rotor konzentrischer Kraftfluß hervorgebracht, der durch die Pole D fließt (in Fig. 57 durch strichpunktierten Linienzug bezeichnet). Zur Kompensierung dieses Flusses schlägt Steinmetz vor, um die Pole eine kompensierende Wicklung K zu legen. Außerdem werden die Polenden mit starken, kurzgeschlossenen, ringförmigen Leitern L versehen, die in der Art wie die Dämpfer von Leblanc zur Abschwächung der Schwankungen des magnetischen Hauptflusses dienen, von Schwankungen, die durch das Passieren der starke Ströme führenden Leiter des Rotors hervorgerufen werden.

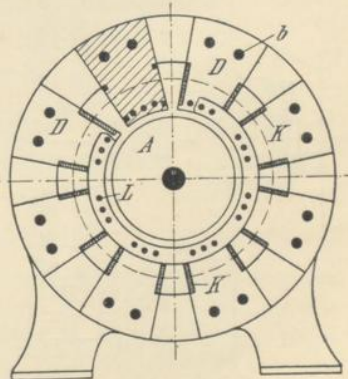


Fig. 57.

Im Jahre 1907 hat Elihu Thomson sich die in Fig. 58 dargestellte Konstruktion einer Unipolarmaschine patentieren lassen.

Im allgemeinen erinnert die Konstruktion sowohl des Rotors wie des Stators an die Konstruktion von Noegerrath, mit dem einzigen Unterschied, daß die der Induktion unterworfenen Leiter a ,

ausgeführt in der Form von flachen Streifen, sich nicht wie bei Noegerrath auf der Oberfläche des Rotors befinden, sondern durch einen ganzen zylindrischen Stahlring a_1 umschlossen sind,

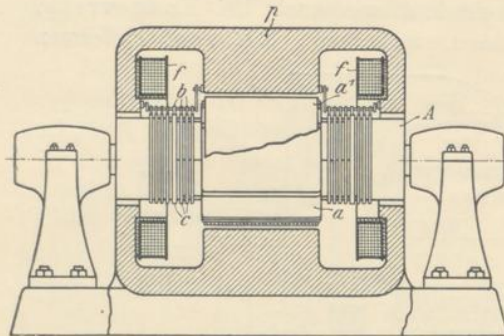


Fig. 58.

für sich in diesem Falle besonders ungünstig ausfällt, da das Reaktionsfeld in der stählernen Bandage einen bequemen Weg findet.

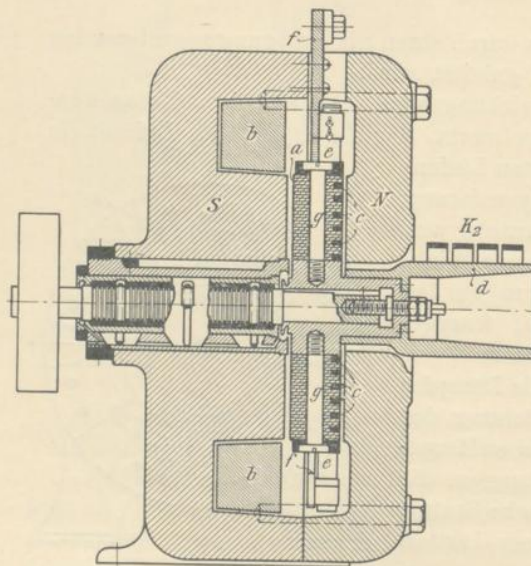


Fig. 59.

heben, hat der amerikanische Ingenieur Wait eine Konstruktion von Unipolarmaschinen vorgeschlagen, die in Fig. 59 und 60 dargestellt ist.¹⁾

¹⁾ Verhandlungen des Vereins zur Beförderung des Gewerbefleißes, Heft 8, 1908.

der einerseits als Bandage dient, andererseits verhindert, daß das Reaktionsfeld des Ankers bis zu den Statorwindungen gelangt. — Dieser Gedanke gibt Grund zur Hoffnung, daß es gelingen kann, die Fluktuationen des Hauptfeldes, die durch einzelne Teile des Rotors hervorgerufen werden, ganz zu vermeiden, obwohl die Ankerreaktion

Die besondere Aufmerksamkeit, die so hervorragende Elektriker, wie P. Steinmetz und E. Thomson, dem Verfahren zuwenden, durch die die Hysterisis und die Wirbelströme in den Unipolarmaschinen verringert werden, läßt vermuten, daß diese Erscheinung in den Maschinen von Noegerrath sich stark bemerkbar macht.

Veranlaßt durch das Bestreben, die Wirbelströme im Rotor ganz zu paralisieren und die Ankerrückwirkung durch eine Compound-Wicklung aufzu-

Der Generator von Wait besitzt einen scheibenförmigen Anker; er besteht aus einem stählernen Bande *a*, das mit einem isolierenden Lack bestrichen ist und auf der Welle mit Schrauben *g* befestigt wird. Auf einer Seite dieses Ankers sind in spiralförmigen Nuten die der Induktion unterworfenen Leiter *c* untergebracht, deren Enden einerseits am Umfang des Rotors mit einem Ringe verbunden sind, der das ganze Ankereisen umgibt, und durch den die Schrauben *g* gehen.

Andererseits sind die Enden dieser spiralförmigen Leiter mit einer auf die Maschinenwelle aufgeschobenen Hülse verbunden. — Auf diese Weise wird die Welle und das Magnetgestell des Generators zu einem Pol der Maschine, während der auf dem Umfang des Rotors befindliche Ring den anderen Pol bildet. Auf diesem Ring schleift eine Reihe von Bürsten, die mit der Sammelschiene verbunden sind, durch die der Strom weiter zu Klemme K_1 geleitet wird.

Von der Maschinenwelle *d* wird der Strom mittels einer Reihe nebeneinander befindlicher Bürsten K_2 fortgeleitet. Da alle zur Erregung erforderlichen Amperewindungen in der Maschine von Wait nur von der einen Seite der Scheibe angeordnet sind, waren zur Vermeidung des Axialdruckes komplizierte Vorrichtungen erforderlich, nämlich ein Kammlager mit einer nicht ganz einfachen Vorrichtung zur Veränderung der Lage der Scheibe gegen die Magnetpole *N* und *S*.

Die Kompoundierung wird dadurch hervorgebracht, daß die in den Rotorleitern induzierten Ströme längs Spiralen fließen. Hierbei müssen natürlich bei einer gegebenen Drehrichtung die Pole *S* und *N* so angeordnet werden, daß die im Rotor induzierten Ströme den magnetischen Flux verstärken, und nicht abschwächen.

Jedoch muß man bemerken, daß die Befestigung des Rotoreisens auf der Welle mit Hilfe der Schrauben *G* sehr unvollkommen

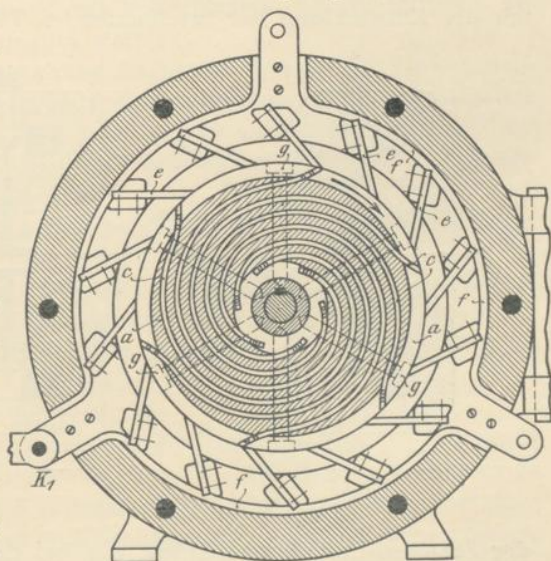


Fig. 60.

ist; die Maschine von Wait wird wohl kaum mit einer genügenden Geschwindigkeit arbeiten können, um Strom für Beleuchtungszwecke oder für Kraftübertragung zu liefern.

Im Laufe der letzten Jahre haben auch die am meisten verbreiteten, speziell elektrotechnischen Zeitschriften, wie die „Elektrotechnische Zeitschrift“, die „Zeitschrift für Elektrotechnik“ und die aus derselben hervorgegangene „Elektrotechnik und Maschinenbau“, u. a. den Unipolarmaschinen immer mehr Aufmerksamkeit zugewendet. Die Arbeiten von Seidener, O. Schulz und Dr. Pohl können als Belege für diese Behauptung gelten. Schon im Jahre 1904 hat der Ingenieur Seidener darauf hingewiesen, daß in Verbindung mit der Entwicklung der raschlaufenden Dampfturbinen die Frage

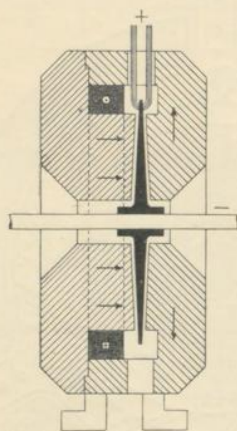


Fig. 61.

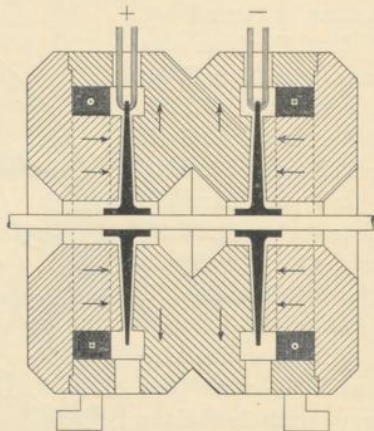


Fig. 62.

der Scheiben-Unipolarmaschinen, die bei den großen Geschwindigkeiten bequemer und auch leichter sind als Maschinen vom Trommeltypus, auf die Tagesordnung kommt.

Damals schlug Seidener die Konstruktion einer Unipolarmaschine sowie einer doppelten Maschine dieser Art vor, wie dieselben in Fig. 61 und 62 abgebildet sind. Die Scheiben dieser Generatoren unterscheiden sich in bezug auf die mechanische Konstruktion wenig von den Scheiben der de Lavalschen und anderer modernen Aktionsturbinen. — Dieser Umstand gibt Grund zu der Ansicht, daß solche Scheiben auch in einem magnetischen Felde mit sehr großer Geschwindigkeit rotieren können, wobei zwischen dem Zentrum der Scheibe und ihrem Umfang eine EMK auftreten würde. Allerdings müßte man zur Gewinnung einer praktisch brauchbaren Spannung bei der beschränkten Länge des der Induktion unterworfenen Leiters — im gegebenen Falle ist diese

Länge zirka gleich dem Radius der Scheibe — zu solchen linearen Geschwindigkeiten seine Zuflucht nehmen, die bisher noch nirgends verwendet worden sind; doch scheint die Verwirklichung dieser Idee keineswegs außerhalb des Bereiches der Möglichkeit zu liegen. Seitdem ein solches Material wie Nickelstahl auf dem Markte erschienen, kann man Scheiben für eine Umfangsgeschwindigkeit bis zu 400 m/sek herstellen. Bei $B = 17000$ und $l \approx r = 40$ cm würde eine solche Geschwindigkeit ermöglichen, zwischen dem Zentrum und dem Umfang der Scheibe eine Spannung zu gewinnen, die gleich $e = B \cdot l \cdot \frac{v}{2} \cdot 10^{-8} = \frac{17000 \cdot 40 \cdot 400}{2 \cdot 100000000} = 135$ Volt ist.

Als Geschwindigkeit ist $v/2$ angenommen, als die mittlere, die im Abstände $\frac{1}{2}$ vom Zentrum statt hat.

Die resultierende Spannung ist praktisch sehr gut verwendbar, besonders in Hinsicht darauf, daß die Glühlampen mit metallischen Glühfäden schon verursacht haben, daß elektrische Zentralen mit einer Spannung von 2×50 Volt entstanden sind. Durch doppelte Ausführung einer Maschine nach Fig. 62 können wir leicht bei der obenerwähnten Geschwindigkeit und Abmessungen der Scheibe eine Spannung erzielen, die höher ist als die jetzt oft angewendete von 2×120 Volt.

Bei der Beschreibung der raschlaufenden Unipolarmaschinen mit Turbinen bemerkt Seidener mit Recht, daß die Hauptschwierigkeit, die sich dem Konstrukteur in diesem Falle entgegenstellt, in der Herstellung eines guten Gleitkontaktes besteht, der bei so enormer Umfangsgeschwindigkeit nicht versagt.

Endlich hat im März 1909 der französische Ingenieur Esnault-Pelterie, nachdem er zu der Überzeugung gekommen war, daß Kontaktvorrichtungen zur Überleitung des Stromes von sich rasch bewegenden Oberflächen auf feststehende Leiter, bei Verwendung von feststehenden Bürsten, nur für Geschwindigkeiten bis zu 150 m/sek verwendbar sind, eine Vorrichtung patentieren lassen, die seiner Meinung nach es gestattet, Strom von induzierten Leitern abzunehmen, die sich mit einer größeren Geschwindigkeit als 150 m/sek bewegen.

Zu diesem Zwecke läßt Esnault-Pelterie die Bürste selbst rotieren. In den Fig. 63 und 64 ist eine solche Vorrichtung dargestellt. Mit der Ziffer 6 ist die Oberfläche des induzierten Leiters bezeichnet, von der der Strom abgenommen werden soll, mit 1 die Bürste, die sich mit einem Ende auf die Oberfläche 6 stützt und mit dem andern Ende den unbeweglichen Kontakttring 7

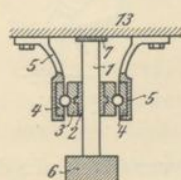


Fig. 63.

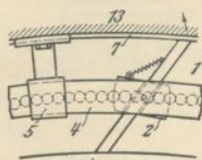


Fig. 64.

berührt, der isoliert an dem Maschinengestell 13 befestigt ist. Die Bürste 1 steckt in einer Hülse 2, die ihrerseits um eine gewisse Achse drehbar zwischen den Ringen 3 eingespannt ist. In diese Ringe 3 sind vertiefte Bahnen für Kugeln eingedreht, ebensolche Bahnen befinden sich auch in den feststehenden Ringen 4, die dieselbe Gestalt wie die Ringe 3 haben, nur sind sie starr an dem Maschinengestell mittels der Stützen 5 befestigt. Wenn nun der induzierte Körper 6 schnell rotiert, so wird die Bürste 1, die an die Oberflächen 6 und 7 durch eine Spiralfeder angedrückt wird, in der Richtung der Bewegung von 6 mitgenommen, nur bewegt sie sich mit einem gewissen Schlupf, da sie gemeinsam mit den Ringen 3 die rollende Reibung der Kugeln überwinden muß. Esnault-Pelterie nimmt an, daß die Bürste 1, falls die Reibung der beiden Enden gegen die Oberflächen 6 und 7 gleich ist, der

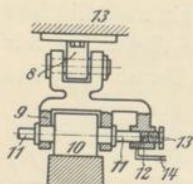


Fig. 65.

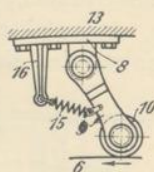


Fig. 66.

Bewegung der Oberfläche 6 folgen wird, und zwar mit der Hälfte der Geschwindigkeit dieses Körpers. Folglich könnte man der Oberfläche 6, ohne die maximal zulässige Gleitgeschwindigkeit von 150 m/sek zu überschreiten, eine absolute lineare Geschwindigkeit von 300 m/sek verleihen. In diesem Falle würde sich die Bürste 1 mit der Hülse 2 und den Ringen 3 mit der für eine so komplizierte Einrichtung enormen Geschwindigkeit von 150 m/sek rotieren. In der Literatur sind vorläufig keine Angaben über den Verlauf der praktischen Arbeiten des genannten Ingenieurs mit seinem Stromabnehmer zu finden, doch ist es zweifelhaft, ob die Kugeln bei Geschwindigkeiten von 150 m/sek betriebssicher sind. In einem späteren Patent ersetzt Esnault-Pelterie die Bürste 1 durch Rollen, von denen eine, Fig. 65 und 66, an die induzierte Oberfläche 6, die andere an die Fläche des Gestells 13 angepreßt wird. Die Scharniere 8, auf denen sich die Rollen 10 befinden, sind auf dem Körper 13 befestigt, entsprechend der Hülse 2 und dem Ringe 3 in Fig. 63 und 64. Aus dem oben Gesagten, sowie auch aus den Zeichnungen 65 und 66 ersieht man, wie kompliziert und unpraktisch diese Vorrichtung ist.

II. Die Untersuchung von Gleitkontakten bei sehr großen Geschwindigkeiten.

Schon vor dem Erscheinen der Arbeit von Seidener im Herbst 1904 in der „Zeitschrift für Elektrotechnik“ kam der Ver-