

Badische Landesbibliothek Karlsruhe

Digitale Sammlung der Badischen Landesbibliothek Karlsruhe

Einleitung

[urn:nbn:de:bsz:31-285100](https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:31-285100)

Die Wendepolstreuung und ihre Berechnung auf Grund experimenteller Untersuchung.

Von Dr.-Ing. F. Schimrigk.

Einleitung.

Die Wendepole und der Anker bilden einen unvollkommenen magnetischen Kreis, auf den zwei gegeneinander gerichtete magnetomotorische Kräfte wirksam sind.

Wir bezeichnen die Amperewindungszahl eines Wendepols mit AW_w , den in den Anker eintretenden Kraftfluß eines Wendepols mit Φ_a , die totale Leitfähigkeit des Kraftflusses Φ_a unter Mitberücksichtigung des Eisenwiderstandes von Pol-, Joch- und Ankerisen mit $\Sigma\lambda_{ax}$. Die nicht mit Ankerleitern verketteten für ihre Zwecke unwirksamen Kraftlinien fassen wir als Streufluß auf und bezeichnen ihn mit Φ_s . Seine totale Leitfähigkeit unter Berücksichtigung des Eisenwiderstandes sei $\Sigma\lambda_{sx}$.

Der Streufluß Φ_s bestimmt sich dann zu

$$\Phi_s = \Sigma\lambda_{sx} \cdot AW_{wx}.$$

Dem Nutzkraftfluß wirkt die MMK des Ankers entgegen, er ist daher

$$\Phi_a = \Sigma\lambda_{ax} \cdot (AW_w - AW_{gx}).$$

Da der Wendepol ziemlich dicht von Eisen umschlossen ist, ist die Leitfähigkeit $\Sigma\lambda_{sx}$ nicht unerheblich.

Der zur Darstellung der Streuung übliche Streukoeffizient σ gibt das Verhältnis des aus dem Joch in den Magnetschenkel eintretenden Kraftflusses Φ_m zu dem in den Anker eintretenden Kraftfluß Φ_a an.

Da

$$\Phi_m = \Phi_a + \Phi_s$$

ist, so ist

$$\sigma = \frac{\Phi_m}{\Phi_a} = 1 + \frac{\Phi_s}{\Phi_a}$$

$$\sigma = 1 + \frac{\sum \lambda_{sx} AW_{wx}}{\sum \lambda_{ax} (AW_w - AW_{gx})} \quad \dots \quad (1)$$

Aus dieser Gleichung ist ohne weiteres ersichtlich, daß der Streukoeffizient in hohem Maße von dem Verhältnis der Amperewindungen $\frac{AW_w}{AW_a}$ abhängig ist und sich dem Werte unendlich nähert, wenn $\frac{AW_w}{AW_a}$ der Einheit nahe kommt. In diesem Falle ist der aus dem Wendepol in den Anker tretende Kraftfluß Null, da zwischen Anker und Wendepol die Potentialdifferenz 0 herrscht. Der Streufluß bleibt jedoch $= \Phi_s = \sum \lambda_{sx} AW_{wx}$ bestehen, ebenso bildet sich der Ankerquerfluß Φ_q gemäß seiner Leitfähigkeit aus und schließt sich durch die Luft und die Hauptpole. Es ist

$$\Phi_q = \sum \lambda_{qx} \cdot AW_{gx}.$$

Die Kraftflüsse Φ_s und Φ_q sind von der Größe der Potentialdifferenz zwischen Wendepol und Anker nahezu unabhängig¹⁾. Lediglich die Leitfähigkeit ihres Weges wird in geringem Maße von derselben beeinflusst.

Wie aus obigen Erörterungen hervorgeht, ist der Streukoeffizient des Wendepolkreises nicht als eine allein vom magnetischen Aufbau der Maschine abhängige Konstante zu betrachten, wie es für die Hauptpole annähernd zutrifft. Er ist vielmehr ein Wert, der beträchtlichen Schwankungen unterworfen ist.

Seine Größe und Abhängigkeit wollen wir im Nachstehenden experimentell und rechnerisch zu bestimmen suchen.

Experimenteller Teil.

1. Meßverfahren und Versuchsanordnung.

Die Streuung einer Maschine bestimmt man gewöhnlich derart, daß man sekundäre Spulen um die zu vergleichenden Teile des magnetischen Kreises wickelt, und die bei Änderung der Felderregung in diesen Spulen auftretenden Induktionen vergleicht.

In nahezu jeder Abhandlung, die sich mit Streuungsmessungen befaßt, wird auf die Bedenken hingewiesen, welche der Benutzung

¹⁾ S. Deiris, Zeitschr. f. Elektrot. 1905, S. 337.

dieses Verfahrens für Messungen an Dynamomaschinen usw. entgegenstehen¹⁾.

Um seine Verwerfung für die vorliegenden Untersuchungen zu begründen, sei auf die Erwägungen hingewiesen, die sie veranlaßten. Die Selbstinduktion der Erregerspulen und die magnetische Trägheit so großer Eisenmassen, wie sie eine Dynamomaschine aufweist, ist so beträchtlich, daß die Zeit, welche für eine Änderung des magnetischen Zustandes gebraucht wird, nicht als klein gegen die Schwingungsdauer des ballistischen Galvanometers anzusehen ist.

Der Ausschlag desselben ist daher nicht unabhängig von dem Verlauf der Kraftflußänderung nach der Zeit. Außerdem hat der remanente Magnetismus einen störenden Einfluß auf die Messungen.

Da eine Meßspule um den Schenkel, die andere im Luftspalt oder im Anker angebracht ist, so umschließen die Spulen Materialien von gänzlich verschiedenem magnetischen Verhalten.

Solange beide Spulen, als von einem gemeinsamen Kraftfluß durchsetzt angesehen werden können, wird durch die Verschiedenheit des zeitlichen Verlaufs des in den Prüfspulen induzierten Stromintegrals die Messung wenig beeinflusst. Bei Wendepolen trifft diese Voraussetzung jedoch nicht zu; denn der nur mit einer Spule verkettete Streufluß ist häufig ein Mehrfaches des beiden Spulen gemeinsamen Induktionsflusses. Dieser wiederum ist ebenso von der Ankererregung als von der des Wendepoles abhängig. Es werden daher nicht nur Änderungen der Induktion in beiden Spulen einen verschiedenen Verlauf nehmen, sondern es wird auch bei Belastungsänderungen der magnetische Zustand der von den beiden Meßspulen umgebenen Materialien sich nach verschiedenen Gesetzen verändern.

Infolgedessen geben derartige Messungen weder nach Größe noch Abhängigkeit von der Belastung einwandfreie Ergebnisse. Durch eine Anzahl von Vorversuchen, bei welchen die Induktionen sowohl durch kleine Änderungen als durch Kommutation der Erregung verursacht wurden, wurde Vorstehendes bestätigt. Die Messungen ergaben Resultate, welche bei beiden Methoden gegeneinander und gegen die nachstehend mitgeteilten Werte erheblich abwichen.

Als Erfordernis für eine zuverlässige Messung der Wendepolstreuung wurde daher der Verzicht auf eine Änderung des Kraftflusses zu seiner Bestimmung angesehen.

¹⁾ W. Wedding, ETZ 1892, S. 67; A. Rotth, ETZ 1902, S. 654; Kohlrusch, Leitf. d. praktischen Physik, Leipzig 1907; Ewing, Magnetische Induktion, Berlin 1892; Du Bois, Magnetische Kreise, Berlin 1894.

Um dieses zu ermöglichen, brachte Verfasser das nachstehend beschriebene Meßverfahren in Anwendung:

Eine den Pol umschließende, bewegliche Meßspule wurde radial vom Joch nach dem Anker geführt.

Bei dieser Bewegung schneidet die Spule den gesamten, aus dem Wendepol austretenden Streufluß. Zieht man dieselbe oder eine andere Meßspule von passender Dimension axial zwischen Wendepol und Anker heraus, so schneidet sie den in den Anker eintretenden Nutzkraftfluß. Genau trifft dies jedoch nur dann zu, wenn die Spulenweite exakt mit dem Abstand der Nullzonen übereinstimmt, welche das Wendefeld scharf gegen das Ankerfeld abgrenzen.

Für eine einzelne Streuungsmessung würde es genügen, die Lage der Nullzonen festzustellen und die Meßspule demgemäß zu bemessen.

Da jedoch bei Änderung der magnetischen Verhältnisse sich auch die Ausbreitung des Wendekraftflusses ändert, so wurden die Messungen in der Weise ausgeführt, daß der in den Anker eintretende Kraftfluß durch Aufnahme der Feldkurve bestimmt wurde.

Die zur Messung der Wendepolstreuung angewandte Versuchsanordnung stellt sich somit, wie folgt, dar:

Der Anker der Maschine wurde festgebremst und die Wendepole nach Bedarf erregt. Da die Dimension der Prüfspule der Ausbreitung des Wendefeldes einigermaßen angepaßt werden mußte, so wurde es erforderlich, die Erregerspule des untersuchten Wendepoles auf die halbe Windungszahl abzuwickeln. Dieser wurde demgemäß mit der doppelten Stromstärke erregt.

Um eine glatte und schnelle radiale Bewegung der Meßspule zu ermöglichen, wurde der Pol mit Führungsschienen aus Rundmessing versehen und die Spule auf einen Rahmen aus Kupferblech gewickelt. Seine Dimensionen sind aus Fig. 1 ersichtlich, ebenso die auf den Rahmen gewickelte Spule, welche aus 10 Windungen sehr dünnen Kupferdrahtes bestand.

Zur Aufnahme der Feldkurve¹⁾ diente eine 25 Windungen enthaltende Prüfspule von nachstehenden Dimensionen (Fig. 2).

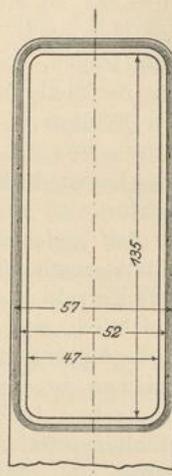


Fig. 1. Große Prüfspule zur Messung des Streuflusses.

¹⁾ E. Arnold, Gleichstrommaschine, 2. Aufl., Bd. I., S. 769.

Auf dem Umfang des Ankers war eine Millimereinteilung angebracht, auf welcher eine verschiebbare Führung angeordnet war. An dieser wurde die Spule in Abständen von 1 bis 2 mm herausgezogen und die Induktionen gemessen.

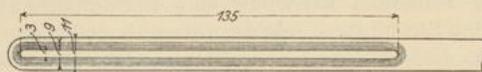


Fig. 2. Kleine Prüfspule zur Aufnahme der Feldkurven.

Die Messungen wurden ausgeführt mit einem ballistischen Galvanometer der Firma Hartmann & Braun von 15 Sekunden Schwin-

gungsdauer. Der Widerstand des Instrumentes beträgt 500Ω . Gewöhnlich wurde mit einem Vorschaltwiderstand von 2000Ω gearbeitet. Nur bei einigen wenigen Messungen reichte dieser nicht aus und wurde auf 5000Ω erhöht.

Infolge der ungleichen Windungszahl der beiden Spulen konnte mit beiden bei gleichem Widerstand des Galvanometerkreises und unter gleich günstigen Schwingungsweiten und Dämpfungsverhältnissen gemessen werden.

Mit Hilfe einer im Instrument vorhandenen Dämpferwicklung von 5Ω , die nach jeder Ablesung kurz geschlossen wurde, wurde eine schnelle Nulleinstellung erreicht. Um die Prüfspulen gegeneinander zu eichen, wurde bei unerregtem Anker die Feldkurve des Wendepols aufgenommen und in Funktion des Ankerumfangs aufgetragen. Die Messungen dieser Kraftfelder, einmal durch Schnitt mit der Spule in Skalenausschlägen, einmal durch Ausplanimetrieren der Feldkurve in cm^2 gefunden, stehen in einem konstanten Verhältnis von 8,4.

Durch Multiplikation des Inhalts der Feldkurve mit diesem Faktor wird der Kraftfluß daher in Skalenteilen ausgedrückt, also in der gleichen Einheit wie der Streufluß. Der Streukoeffizient könnte somit ohne weiteres aus ihnen berechnet werden, wenn nicht eine Korrektur erforderlich wäre. Es wird nämlich, wie aus Fig. 3 ersichtlich, von der großen Spule außer dem Streufluß ein Teil des Ankerfeldes geschnitten. Dieser, der in der Figur schraffiert hervorgehoben ist, addiert sich zu dem eigentlichen Streufluß. Sein Äquivalent in Skalenteilen ist daher von dem für den Streufluß erhaltenen Galvanometerausschlag abzuziehen. Bei dieser Korrektur wurde die räumliche Ausdehnung der Windungen der Meßspule und die Abnahme der schneidenden Windungszahl derselben, wie in Fig. 3 angedeutet, berücksichtigt.

Die auf die geschilderte Weise aufgenommenen Feldkurven können nicht den Anspruch erheben, ein in allen Einzelheiten exaktes Bild der Kraftflußverteilung unter dem Wendepol zu geben.

Dort ist der Feldverlauf so unstetig, daß hierfür eine noch schmalere Spule erforderlich wäre. Für die vorliegenden Untersuchungen liegt ein Bedürfnis nach einer so genauen Kenntnis des Feldverlaufes unter dem Pol nicht vor, sondern nur nach dessen Kenntnis zwischen den Polen. Hier ist aber der Verlauf ziemlich stetig, seine Messung daher mit den angewandten Mitteln genügend genau.

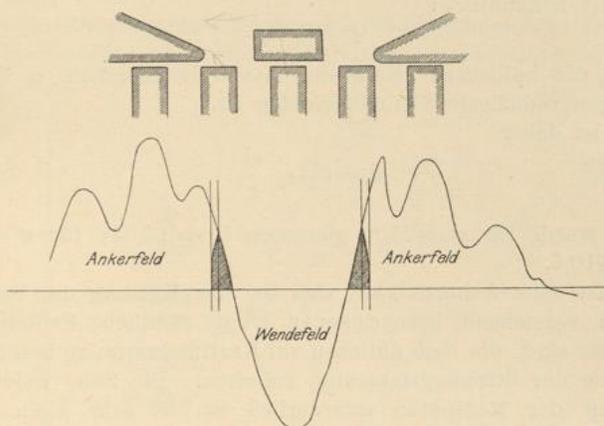


Fig. 3. Wendefeld und Ankerfeld bei unerregten Hauptpolen. Die schraffierten Flächen geben den bei der Streuflußmessung gemachten Fehler an und dienen zu seiner Korrektur.

Zur Bestimmung des Streukoeffizienten ist eine Eichung des Galvanometers nicht notwendig. Sie wurde jedoch mit Hilfe einer eisenfreien Induktionsspule von bekannter Dimension vorgenommen, da die Kenntnis der absoluten Werte der Kraftflüsse für die Kontrolle der Berechnung und der Sättigungen von Interesse ist¹⁾.

Bekanntlich ist der geschnittene Kraftfluß lediglich dem Galvanometerausschlag proportional, unabhängig von der Schnittgeschwindigkeit, wenn diese nur genügend groß ist.

Bezeichnen wir die Windungszahl der Meßspule mit Z , den Widerstand des Galvanometerkreises mit W , die induzierte Elektrizitätsmenge mit Q , so besteht die Beziehung

$$Q = \int i \cdot dt = \frac{1}{W} \int e \cdot dt.$$

Da

$$e = -Z \frac{d\Phi}{dt},$$

¹⁾ Leitfaden für elektrot. Laboratorium I, Karlsruhe.

so ist

$$Q = \int i \cdot dt = -\frac{Z}{W} \int d\Phi.$$

Wird der gesamte Kraftfluß Φ geschnitten, so ist

$$Q = \frac{Z}{W} \Phi.$$

Ferner ist bekanntlich:

$$Q = C_b \cdot e_b,$$

wenn C_b die ballistische Konstante des Galvanometers, e_b der auf den Bogen reduzierte Skalenausschlag ist.

Es ist daher

$$\Phi = C_b \cdot e_b \cdot \frac{w}{z}.$$

Es wurde für $w = 2500$ gemessen $C_b = 13,05$; für $w = 5500$ ist $C_b = 10,2$.

Es ist ohne weiteres klar, daß bei der Messung der Streuung auf dem vorstehend beschriebenen Wege sämtliche Fehlerquellen vermieden sind, die dem üblichen auf Kraftflußvariation beruhenden Verfahren der Streuungsmessung anhaften. Die Zeit, welche zur Bewegung der Meßspulen erforderlich ist, ist sehr klein. Neue Fehlerquellen können bei genügender Sorgfalt in der Ausführung der Messungen kaum auftreten.

Von der Aufzeichnung der Einzelwerte der Messungen in Tabellenform wurde Abstand genommen in der Überlegung, daß derartige Tabellen bei sehr beträchtlicher Rauminanspruchnahme geringes Interesse bieten. Statt dessen wurden die wesentlichen Meßwerte graphisch aufgetragen, wodurch die Ableitung der Endresultate in anschaulicher Weise vor Augen geführt wird.

Jeder Punkt der aufgetragenen Kurven mit Ausnahme der Feldkurven ist der Mittelwert aus mehreren Messungen. Sämtliche notwendigen Starkstrommessungen wurden mit Millivolt- und Ampere-meter ausgeführt unter Berücksichtigung der Korrekturen der betreffenden Instrumente.

Eine rechnermäßige Darlegung der Genauigkeit erscheint in diesem Falle ziemlich wertlos, weil bei einer solchen nur die Meß- und Beobachtungsfehler exakte Berücksichtigung finden. Diese sind jedoch verschwindend klein gegen die durch das Aufzeichnen und Auswerten der Feldkurven entstehenden.

Der einzige ins Gewicht fallende Fehler entsteht durch die Ausführung der Messungen unter magnetischen Verhältnissen, welche von den bei normalem Betriebe obwaltenden abweichen. Die Streuung wurde nämlich bei unerregten Hauptpolen gemessen. Der da-

durch entstehende Fehler wurde experimentell ermittelt und kommt späterhin zur Darstellung. Er liegt seiner Größenordnung nach unter der Fehlergrenze, welche man für derartige Messungen zulassen muß.

2. Experimentelle Untersuchung der Wendepole.

Als Versuchsmaschine diente eine Wendepolmaschine der Firma Ernst Heinrich Geist, Elektrizitäts-Aktien-Gesellschaft in Köln¹⁾.

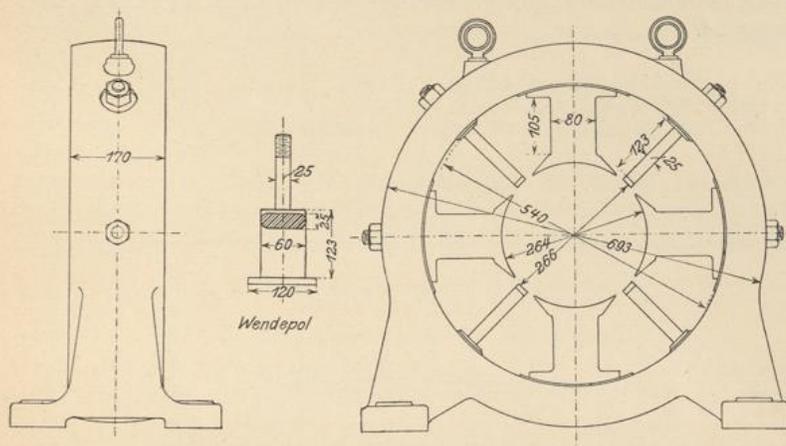


Fig. 4.

Ihre normale Leistung beträgt 12,5 PS bei 950 Touren. Die für das magnetische Verhalten der Maschine wesentlichen Dimensionen sind aus Fig. 4 zu entnehmen. Die übrigen, für die Verfolgung der Untersuchungen notwendigen Daten sind folgende:

Gesamte Länge der Hauptpole und des Ankers	= 120 mm
Wirksame Leiterzahl des Ankers 594
Windungszahl eines Hauptpoles 1430
Windungszahl eines Wendepoles 224

Die Wendepolspulen sind in vier Gruppen parallel geschaltet, ihre normale Erregerstromstärke ist daher $\frac{1}{4}$ des Ankerstromes. Die auf einen Wendepol entfallende Amperewindungszahl des Ankers ist

$$AW_a = \frac{J_a}{2a} \cdot \frac{\text{wirksame Leiterzahl}}{4p} = \frac{\tau}{2} AS.$$

¹⁾ An dieser Stelle spreche ich der Firma E. H. Geist für das mir bei Lieferung der Versuchsmaschine bewiesene Entgegenkommen meinen besten Dank aus.

Das Amperewindungsverhältnis $\frac{AW_w}{AW_a}$ ist bei normalem Betrieb der Maschine 1,5.

Da die Messungen der Kraftflüsse bei stillstehendem Anker vorgenommen wurden und der Versuchswendepol mit der zwei- bis vierfachen Stromstärke beansprucht werden mußte, so waren die Abkühlungsverhältnisse so ungünstig, daß eine Vollbelastung der Maschine nicht durchgeführt werden konnte. Aus diesem Grunde wurde die Maschine nur bis zu 36 bis 42 Ampere belastet, während unter normalen Verhältnissen eine Stromstärke von 50 Ampere zulässig ist.

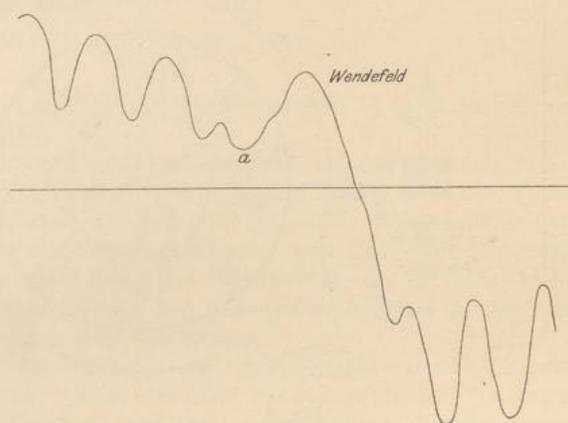


Fig. 5. Feldkurve der Haupt- und Wendepole bei belastetem Anker.
 $J_a = 24.$ $J_w = 6.$ $i_n = 0,5.$

Wie bereits erwähnt, wurden die Versuche bei unerregten Hauptpolen angestellt. Der Grund für diese Abweichung von den normalen Arbeitsbedingungen ist der folgende:

Während bei unerregten Hauptpolen die Ausdehnung des Wendefeldes scharf begrenzt ist, verwischt bei erregten Hauptpolen diese Grenze zwischen den Polen gleicher Polarität. Die in Fig. 5 dargestellte Feldkurve macht dieses bei *a* deutlich. Sie zeigt das Wendefeld und das Hauptfeld bei belastetem Anker. Ihre Aufnahme erfolgte wie die der übrigen dargestellten Feldkurven bei stillstehendem Anker. Die Schwankungen der Feldkurve sind daher auf den Einfluß der Nuten zurückzuführen.

Ferner bringt der Fortfall der Erregung der Hauptpole eine wesentliche Vereinfachung der magnetischen Verhältnisse mit sich, so daß ihre Übersicht und Verfolgung sehr erleichtert ist.

Natürgemäß ist eine solche Abweichung von den normalen Betriebsverhältnissen nur dann angängig, wenn durch sie kein erheblicher Fehler verursacht wird. Dieses ist, wie nachstehende Messungen lehren, nicht der Fall.

Fig. 6a bringt die Abhängigkeit des Streukoeffizienten von der Hauptpolarregung. Der Luftspalt der Wendepole bei dieser Messung betrug 6 mm. Die Wendepole waren konstant mit 12 Amp. erregt, was etwa der normalen Vollaststromstärke entspricht. Der Anker war stromlos. Wie ersichtlich, ist die Größe des Streukoeffizienten von der magnetomotorischen Kraft der Hauptpole nahezu unbeeinflusst. Der Streukoeffizient zeigt eine sehr geringe Abnahme

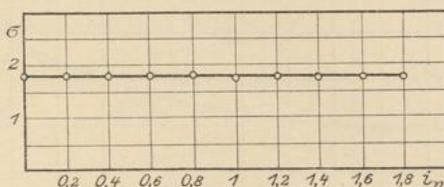


Fig. 6a. Einfluß der Hauptpolarregung auf die Größe des Streukoeffizienten des Wendepoles bei stromlosem Anker.

unbeeinflusst. Der Streukoeffizient zeigt eine sehr geringe Abnahme

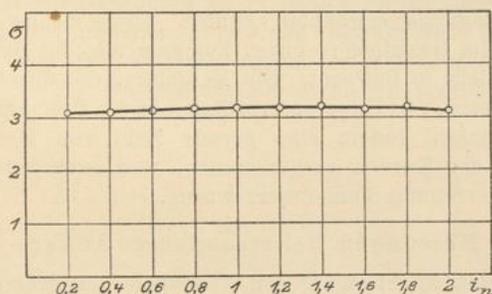


Fig. 6b. Einfluß der Hauptpolarregung auf die Größe des Streukoeffizienten des Wendepols bei belastetem Anker.

mit wachsendem i_n . Dieselbe Beziehung bei belastetem Anker zeigt Fig. 6b. Der Ankerstrom J_a beträgt 12 Amp., das Amperewindungsverhältnis $\frac{AW_w}{AW_a} = 1,5$. Der Verlauf dieser Kurve lehrt, daß bei geringeren Erregungen der Streukoeffizient etwas größer wird, bei Eintritt stärkerer Sättigungen wieder abnimmt.

Die gesamten Änderungen sind prozentuell sehr gering, der maximale Unterschied gegen die bei $i_n = 0$ angestellten Messungen beträgt nur ca. 3%.

Um den Nachweis zu erbringen, daß auch die Abhängigkeit des Streukoeffizienten von der Belastung keine wesentliche Beein-

flussung durch die Hauptpolerregung erfährt, kommt diese für $i_n = 0$ und $i_n = 0,5$ in Fig. 7 zur Darstellung.

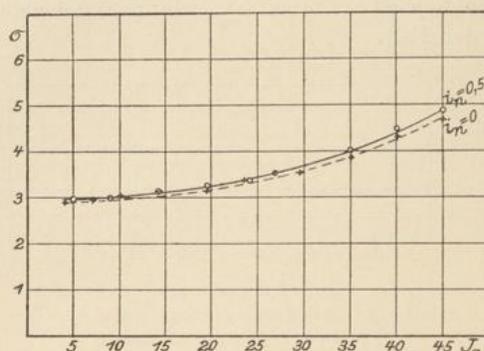


Fig. 7. Abhängigkeit des Streukoeffizienten von der Ankerbelastung bei erregten und unerregten Hauptpolen.

großen Meßspule gemessen, ohne Berücksichtigung der dadurch entstehenden, eingangs erwähnten Fehler. Diese Fehler sind unabhängig von der Hauptpolerregung, kommen also für den vorliegenden Zweck nicht in Betracht. Die Meßfehler, die durch unsymmetrisches Eintreten von Hauptpolkraftlinien in die Prüfspule entstehen, wurden eliminiert, indem eine gerade Zahl von Messungen für jeden Punkt der Kurven vorgenommen, und nach jeder einzelnen die Hauptpolerregung kommutiert wurde.

Messungen bei stromlosem Anker.

Wenngleich die Streuung der Wendepole bei stromlosem Anker für den Betrieb der Maschine ohne Bedeutung ist, hat sie doch

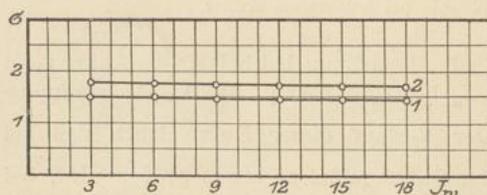


Fig. 8a. Abhängigkeit des Streukoeffizienten von der Wendepolerregung bei unbelastetem Anker.

theoretisches Interesse. Wie der in Fig. 8a dargestellte Streukoeffizient als Funktion der Erregung zeigt, ist er wesentlich konstant.

Auch die Erregung der Hauptpole ist ohne Einfluß auf seine Größe.¹⁾ Der Streukoeffizient bei unbelastetem Anker kann daher als eine vom mechanischem Aufbau der Maschine allein abhängige Kon-

¹⁾ E. Arnold, Gleichstrommaschine, 2. Aufl., Bd. I, S. 567.

stante angesehen werden. Kurve 1 in Fig. 8a zeigt die Größe des Streukoeffizienten bei einem Luftspalt von 3 mm, Kurve 2 bei einem solchen von 6 mm unter sonst gleichen Verhältnissen. Die

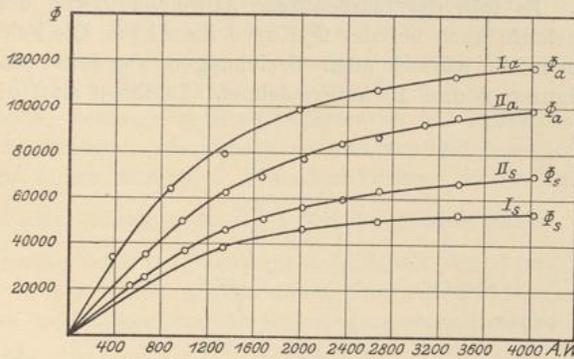


Fig. 8b. Streu- und Nutzkraftfluß der Wendepole in Abhängigkeit von ihrer Erregung bei unbelastetem Anker. I. 3 mm Luftspalt. II. 6 mm Luftspalt.

Länge des Wendepolschuhes ist in beiden Fällen gleich der Ankerlänge. Bei der ersteren Anordnung beträgt der Koeffizient im Mittel 1,47, bei der letzteren erhöht er sich auf 1,73, also um etwa 18%. In Fig. 8b sind die Magnetisierungskurven des Wende-

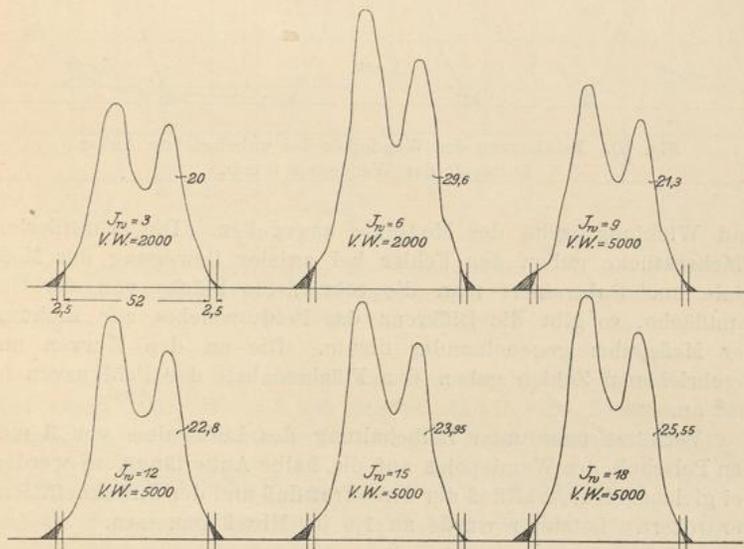


Fig. 9. Feldkurven der Wendepole bei unbelastetem Anker. Luftspalt der Wendepole 3 mm.

polkreises mit dem Streu- und Nutzfluß eines Wendepoles für einen Luftspalt von 3 und 6 mm darstellt. Die Kurven Ia und Is sind bei einem Luftspalt von 3 mm, IIa und IIs bei einem solchen von 6 mm gemessen. Es fällt die beträchtliche Abweichung von dem gradlinigen Verlaufe auch bei der Φ_s -Kurve ins Auge. Die Feldkurven, aus welchem die vorstehenden Beziehungen abgeleitet sind, sind in den Figuren 9 und 10 aufgezeichnet. In ihnen sind die Weite

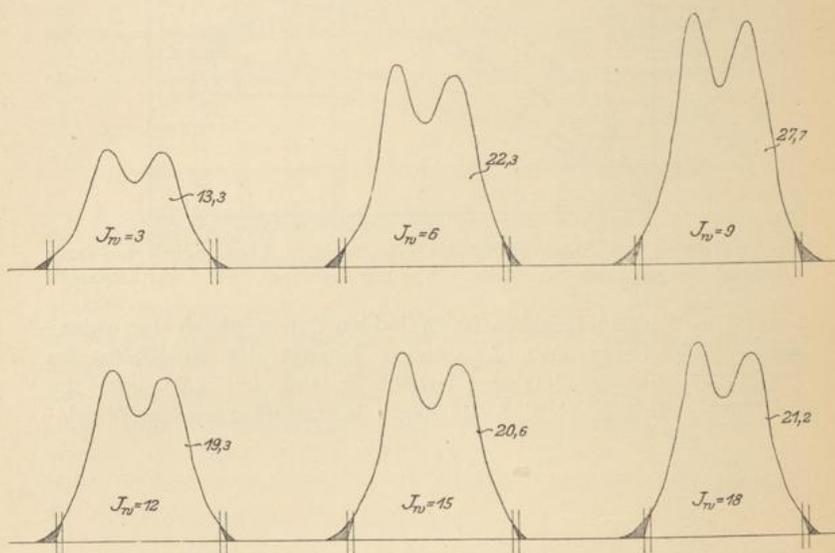


Fig. 10. Feldkurven der Wendepole bei unbelastetem Anker.
Luftspalt der Wendepole 6 mm.

und Wicklungsbreite der Meßspule angegeben. Die schraffierten Flächenstücke geben den Fehler bei axialer Bewegung der Meßspule an. Subtrahiert man die schraffierte Fläche von der Gesamtfläche, so gibt die Differenz das Feld, welches zur Eichung der Meßspulen gegeneinander diente. Die an den Kurven angeschriebenen Zahlen geben den Flächeninhalt der Feldkurven in cm^2 an.

Verkürzt man unter Beibehaltung des Luftspaltes von 3 mm den Polschuh des Wendepoles auf die halbe Ankerlänge, so werden bei gleichem Nutzstromfluß der Streukraftfluß und der Streukoeffizient vergrößert. Letzterer wurde zu 1,6 im Mittel gemessen.

Untersuchungen an der belasteten Maschine.

Bei Belastung des Ankers werden die Streuungsverhältnisse, wie in der Einleitung kurz begründet, wesentlich ungünstiger. Es kommt nun als Faktor von einschneidender Bedeutung das Verhältnis der Amperewindungen des Ankers zum Wendepol in Betracht. Die Art dieses Einflusses weist die in Fig. 11a dargestellte Kurve nach, welche den Streukoeffizienten bei konstantem Ankerstrom als Funktion des Amperewindungsverhältnisses der Wendepole zum Anker darstellt. Wie der Verlauf dieser Kurve zeigt, wächst σ sehr schnell, wenn $\frac{AW_w}{AW_g}$ sich der Einheit nähert. Fig. 11b zeigt dieselbe Beziehung bei einem Luftspalt von 6 mm.

Die in der letzteren gezeichnete Kurve liegt höher und wächst außerdem mit sinkendem Amperewindungsverhältnis schneller an.

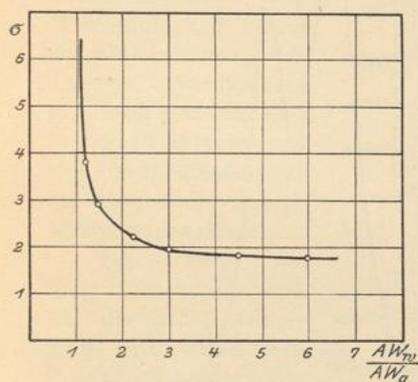


Fig. 11a.

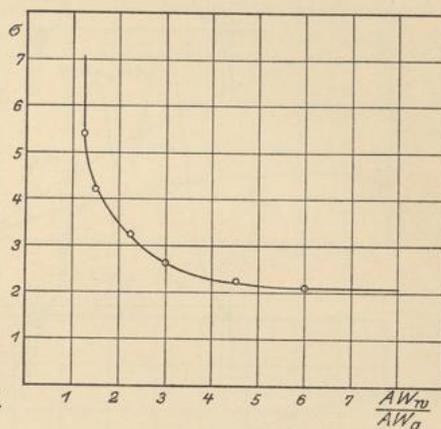


Fig. 11b.

Fig. 11a und 11b. Abhängigkeit des Streukoeffizienten von dem Verhältnis der Amperewindungen des Wendepoles zu denen des Ankers.

a) Luftspalt 3 mm. b) Luftspalt 6 mm.

Die Feldkurven, welche zur Berechnung der Kraftflüsse Φ_a bei einem Luftspalt von 3 mm dienen, sind in Fig. 12 aufgezeichnet. Aus ihnen ist die Veränderlichkeit der Kraftflüßausbreitung unter dem Pol bei verändertem $\frac{AW_w}{AW_g}$ ersichtlich. Die schraffierten Kurvenstücke dienen zur Korrektur des Fehlers bei Messung des Streuflusses der dadurch entsteht, daß Teile des Ankerfeldes mitgeschnitten werden. Wie ersichtlich, ist er unter Umständen nicht

unerheblich. Beim normalen Betriebe der Maschine ist $\frac{AW_w}{AW_g}$ konstant. Für diesen Fall ist der Streukoeffizient in Abhängigkeit von

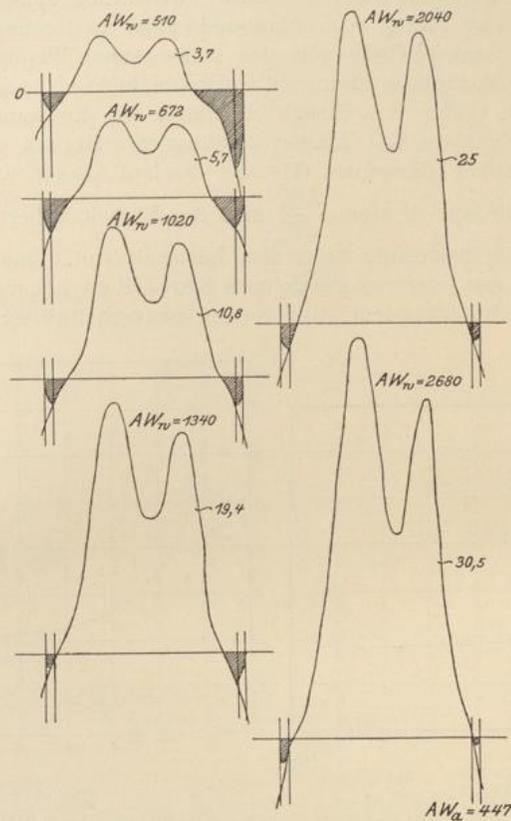


Fig. 12. Feldkurven zur Berechnung des Streukoeffizienten bei wachsendem AW_w und konstantem AW_g . Die angeschriebenen Zahlen geben den Inhalt der Feldkurven in cm^2 . Die schraffierten Flächen dienen zur Korrektur des gemessenen Streufusses. Der Luftspalt des Wendepoles beträgt 3 mm.

der Ankerbelastung in Fig. 13 dargestellt, und zwar gibt Kurve 1 den Streukoeffizienten bei einem Amperewindungsverhältnis von 1,5, Kurve 2 bei einem solchen von 3 an. Der Luftspalt des Wendepoles beträgt 3 mm. Aus dem Verlauf der Kurven geht hervor, daß der Streukoeffizient erheblich mit der Belastung wächst. In den zugehörigen Magnetisierungskurven Fig. 13a und 13b fällt

eine starke Abweichung von der geradlinigen Magnetisierung auf. Diese ist um so beträchtlicher, je höher die Sättigungen des Wendepolkreises sind. Daher ist sie bei der in Fig. 13 b gegebenen Beziehung, wo die Erregung doppelt so stark ist, mehr ins Auge fallend, als in der anderen.

Die Streukoeffizienten, wie sie bei einem Luftspalt des Wendepols von 6 mm unter Beibehaltung der übrigen Verhältnisse gemessen wurden, sind in Fig. 14 aufgetragen. Der Streukoeffizient hat um etwa 65% höhere Werte angenommen.

Bei einem Luftspalt von 3 mm und auf die halbe Ankerlänge verkürztem Polschuh nehmen die Magnetisierungskurven den in Fig. 15 a und 15 b angegebenen Verlauf. Sowohl Φ_a wie Φ_s weisen infolge des größeren Einflusses der Luftwiderstände bei absolut kleineren Sättigungen einen mehr gradlinigen Verlauf auf, als in den bisher gebrachten Kurven zu beobachten war. Die für

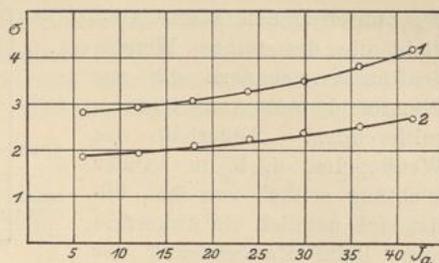


Fig. 13. Abhängigkeit des Streukoeffizienten von der Belastung der Maschine. Für Kurve 1 ist

$$\frac{AW_w}{AW_g} = 1,5, \text{ für Kurve 2 } \frac{AW_w}{AW_g} = 3.$$

Der Luftspalt beträgt 3 mm.

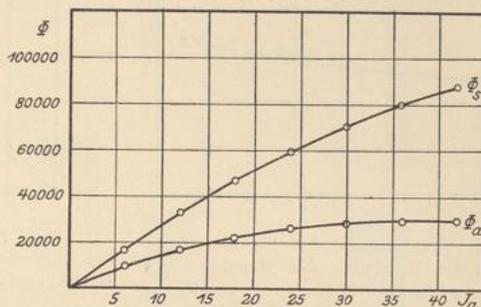


Fig. 13 a.

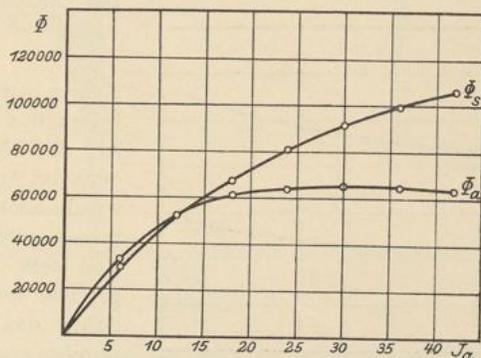


Fig. 13 b.

Fig. 13 a und b. Abhängigkeit des Nutz- und Streukraftflusses von der Belastung der Maschine. Luftspalt der Wendepole 3 mm.

a) bei $\frac{AW_w}{AW_g} = 1,5$; b) bei $\frac{AW_w}{AW_g} = 3$.

Φ_a aufgetragenen Werte sind nicht die des reinen Wendekraftflusses, sondern die aus Wendefeld und Ankerfeld resultierenden. Außerhalb des Wendepoles, d. h. in axialer Richtung seitlich von ihm, bildet sich nämlich ein Ankerfeld aus. Beim Herausziehen der

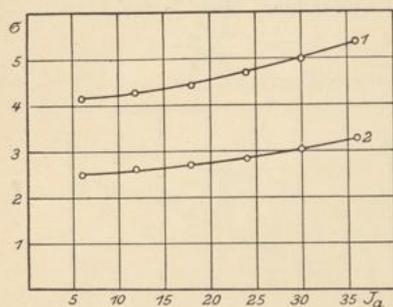


Fig. 14. Abhängigkeit des Streukoeffizienten von der Belastung der Maschine. Für Kurve 1 $\frac{AW_w}{AW_g} = 1,5$, für Kurve 2 $\frac{AW_w}{AW_g} = 3$. Der Luftspalt beträgt 6 mm.

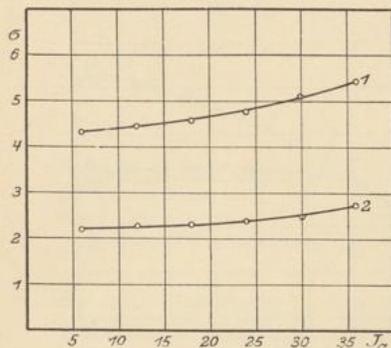


Fig. 16. Abhängigkeit des Streukoeffizienten von der Belastung der Maschine. Kurve 1: $\frac{AW_w}{AW_g} = 1,5$; Kurve 2: $\frac{AW_w}{AW_g} = 3$. Der Luftspalt des Wendepoles beträgt 3 mm. Die Wendepolschuhe sind auf die halbe Ankerlänge verkürzt.

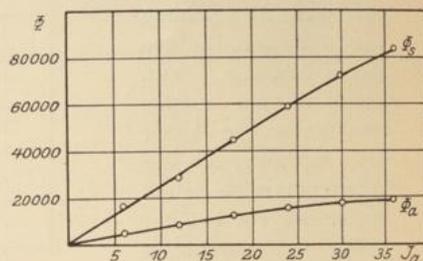


Fig. 15a.

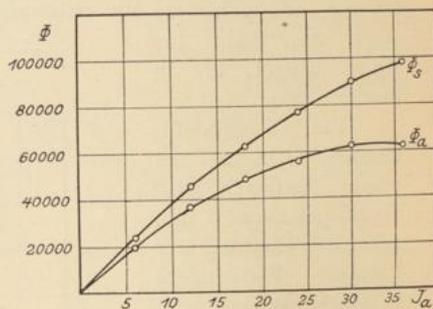


Fig. 15b.

Fig. 15 a und b. Abhängigkeit des Nutz- und Streukraftflusses von d. Belastung d. Maschine.

a) bei $\frac{AW_w}{AW_g} = 1,5$, b) bei $\frac{AW_w}{AW_g} = 3$.

Der Luftspalt beträgt 3 mm. Die Wendepolschuhe sind auf die halbe Ankerlänge verkürzt.

Meßspule wird dieses mit geschnitten. Da es in diesem Falle nicht möglich ist, den Nutzkraftfluß zu messen, ohne das Ankerfeld mit zu schneiden, wurde letzteres mit in die Größe des Streukoeffizienten eingeschlossen. Von dem der Berechnung von σ zugrunde gelegten Nutzkraftfluß ist daher das axial seitlich der Polschuhe ausgebildete Ankerfeld abgezogen. Es hat diese Einbeziehung des Ankerfeldes in den Streukoeffizienten dadurch eine gewisse Berechtigung, daß das aus beiden Feldern resultierende Feld das für die Kom-

mutation und die Wirkungsweise des Wendepols maßgebende ist. Wenn man den Einfluß des Ankerfeldes berücksichtigt, so ist es nicht verwunderlich, daß bei einem kleinen Amperewindungsverhältnis also relativ großem Ankerfeld, der Streukoeffizient erheblich größere Werte annimmt, als bei längerem Polschuh. (Fig. 16.)

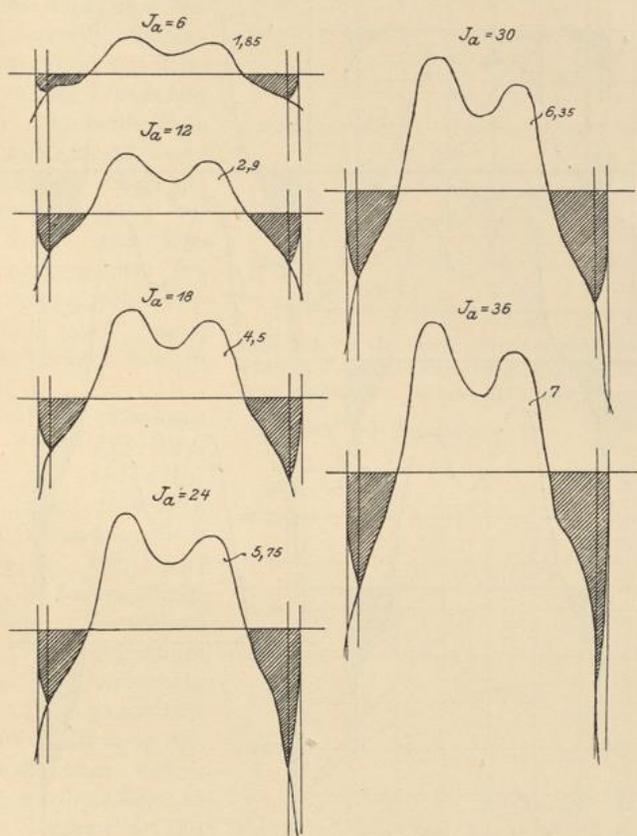


Fig. 17. Feldkurven der Wendepole bei verkürzten Wendepolschuhen.

$$\text{Luftspalt } 3 \text{ mm. } \frac{AW_w}{AW_g} = 1,5.$$

Bei einem höheren Verhältnis der Amperewindungen erstreckt sich das Wendefeld in axialer Richtung weiter über den Anker, und das Ankerfeld wird an seiner Ausbildung gehindert.

Demgemäß ist für diesen Fall, wie aus Kurve II in Fig. 16 ersichtlich, der Streukoeffizient nur unwesentlich höher als der in

Kurve II der Fig. 13 gezeichnete, welcher bei unverkürztem Wendepolschuh und gleichem Luftspalt gemessen wurde.

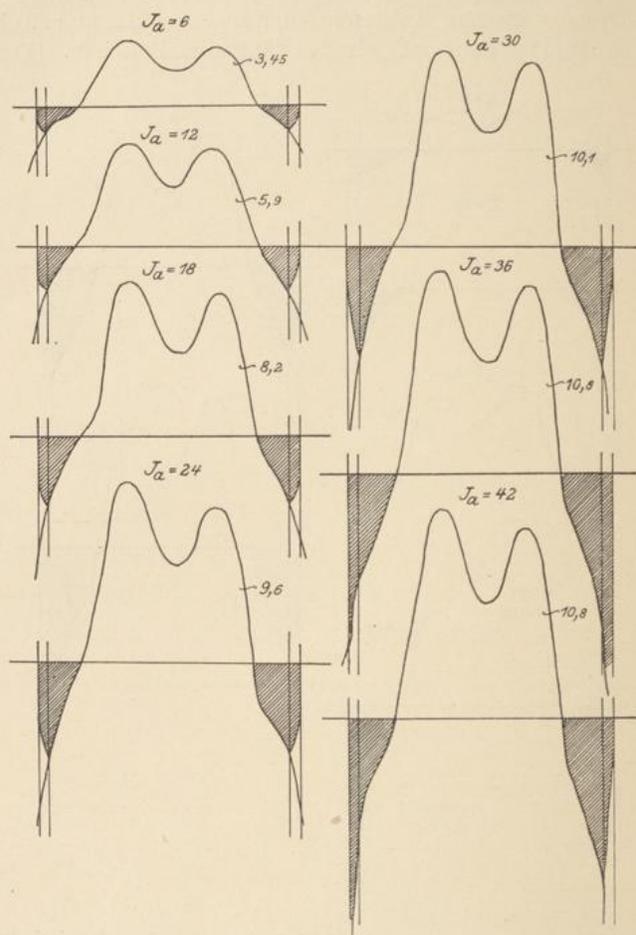


Fig. 18. Feldkurven der Wendepole bei Wendepolschuhen von der Länge des Ankers. Luftspalt 3 mm. $\frac{AW_w}{AW_g} = 1,5$.

Die obenerwähnte Ausbildung des Ankerfeldes in der Achsenrichtung seitlich von den Polschuhen, sofern letztere verkürzt sind, wurde durch Aufnahme der Feldkurve außerhalb des Polschuhes experimentell festgestellt. Es zeigte sich ein deutlich ausgebildetes

negatives Feld bei $\frac{AW_w}{AW_g} = 1,5$. Bei dem Amperewindungsverhältnis 3 war das Feld außerhalb des Polschuhes bereits positiv, aber sehr klein. Das ist erklärlich, da dieses die Summe aus den nützlichen Streulinien des Wendepols und dem Ankerfeld darstellt. Infolge der Subtraktion des letzteren von dem Wendefeld wird die kommutierende Zone naturgemäß verschmälert, was durch die Feldkurven Fig. 17 bestätigt wird. Zum Vergleich bringen wir die Feldkurven bei voller Polschuhlänge und sonst gleichen Verhältnissen in Fig. 18.

Von Interesse sind ferner noch die Messungen, die an der Maschine vorgenommen wurden, nachdem zwei Wendepole entfernt waren. Die beiden übrigbleibenden Wendepole standen sich gegenüber und wurden gleichnamig erregt. Die Magnetisierungskurven, die unter diesen Verhältnissen aufgenommen wurden, sind in Fig. 19a dargestellt. Ein Vergleich mit Fig. 19b, die den Verlauf bei vier Wendepolen und gleicher Erregung eines Poles darstellt, zeigt, daß das Vorhandensein eines zweiten Poles auf die Größe des Kraftflusses unter dem anderen praktisch keinen Einfluß hat. Auch der Streukoeffizient ist nach Größe und Verlauf in völliger Übereinstimmung mit dem früher (Fig. 14) bei vier Wendepolen, bei gleicher Erregung eines Poles, festgestellten Streukoeffizienten (Fig. 20).

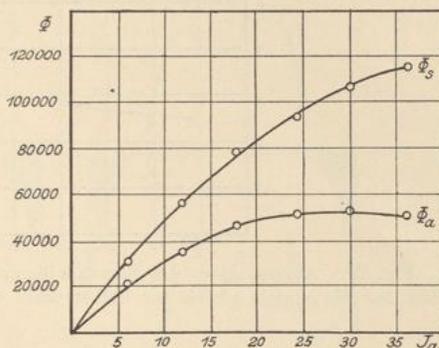


Fig. 19a. Nutz- und Streukraftfluß in Abhängigkeit von der Belastung. Zahl der Wendepole gleich der halben Zahl der Hauptpole.

Luftspalt des Wendepols 6 mm. $\frac{AW_w}{AW_g} = 3$.

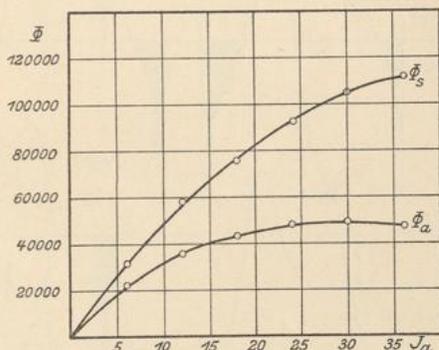


Fig. 19b. Nutz- und Streukraftfluß in Abhängigkeit von der Belastung. Zahl der Wendepole gleich der Zahl der Hauptpole.

Luftspalt des Wendepols 6 mm. $\frac{AW_w}{AW_g} = 3$.

Die vorstehend mitgeteilten Messungen wurden bei einer Stellung der Bürsten in der neutralen Zone vorgenommen. Verschiebt man

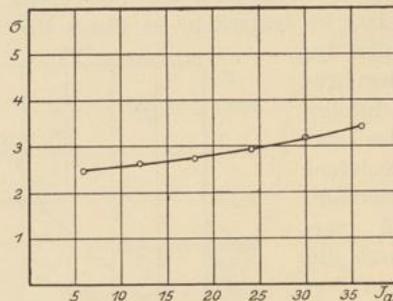


Fig. 20. Abhängigkeit des Streukoeffizienten von der Ankerbelastung. Zahl der Wendepole gleich der halben Zahl der Hauptpole. Luftspalt 6 mm.

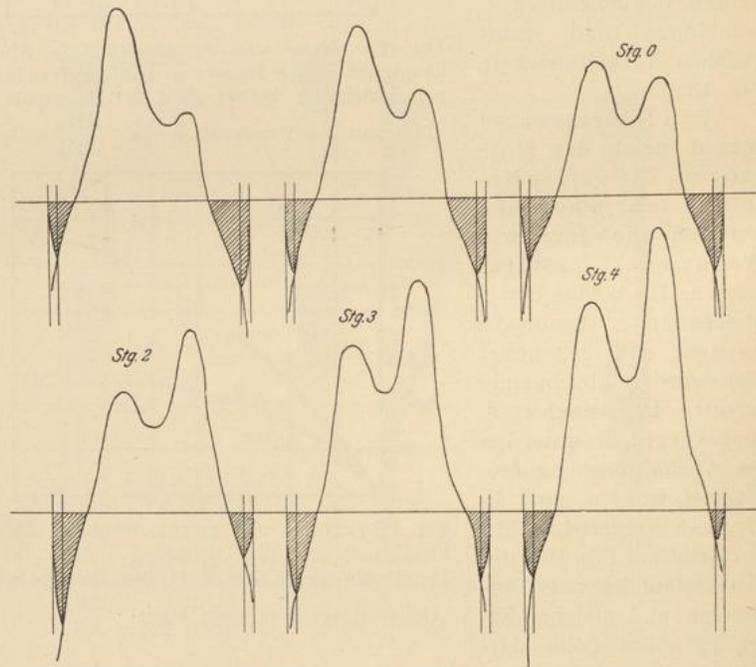


Fig. 21. Feldkurven des Wendepoles bei Bürstenverschiebung. Luftspalt 3 mm. $J_a = 24$; $J_m = 6$.

die Bürsten aus derselben, so findet eine Verdrehung der Achse des Ankerfeldes statt. Die aus dem Wendepol austretenden Kraft-

linien sind daher mit ungleichen Gegenamperewindungen verschlungen. Außerdem befinden sich unter den Polen einseitig stromführende Ankerleiter, die eine Quermagnetisierung bewirken.

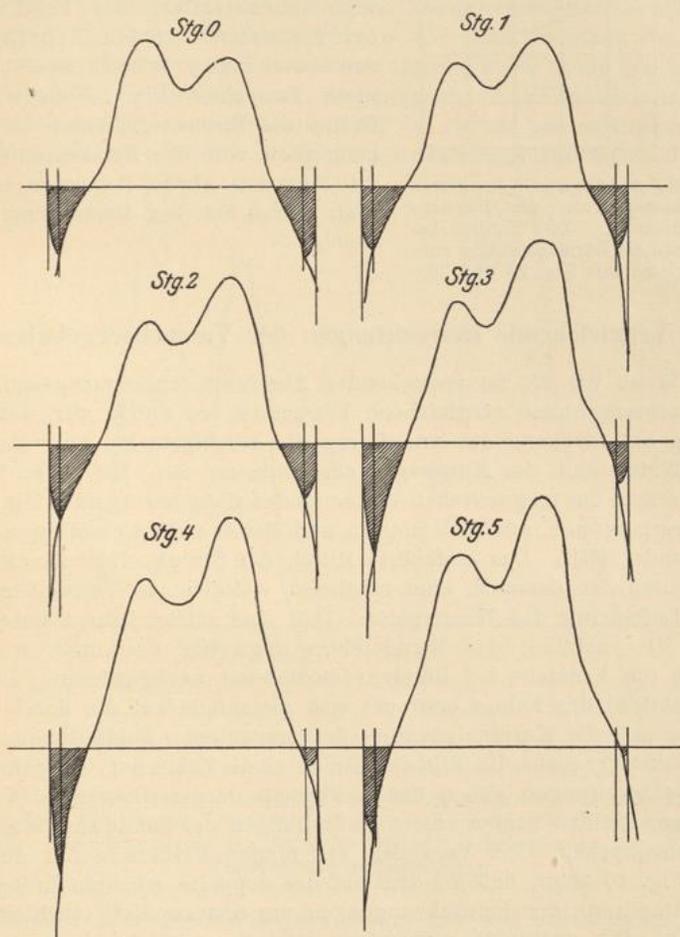


Fig. 22. Feldkurven des Wendepoles bei Bürstenverschiebung.
Luftpalt 6 mm. $J_a = 24$; $J_w = 6$.

Die aus obigen Einflüssen resultierende Verzerrung des Feldes ist aus den Feldkurven in Fig. 21 und 22 zu erkennen. E. Arnold und W. Oelschläger haben bereits auf die Empfindlichkeit, welche das Wendefeld gegen die Verschiebung der Bürsten aus der neutralen Zone zeigt, hingewiesen und auf die günstige Wirkung einer

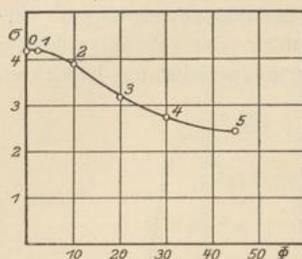


Fig. 23. Abhängigkeit des Streukoeffizienten von der Bürstenverschiebung. Die Zahlen bezeichnen die Bürstenstellung zum Vergleich mit Fig. 22 und 23.

Vergrößerung des Luftspaltes in dieser Hinsicht aufmerksam gemacht.¹⁾ Die Figuren 21 und 22, von denen erstere die Feldkurve bei 3, letztere bei 6 mm Luftspalt zur Anschauung bringt, bestätigen diese Tatsache. Fig. 23 zeigt die Größe des Streukoeffizienten in Abhängigkeit von der Bürstenstellung; die Funktion wurde für einen Luftspalt von 6 mm zur Darstellung gebracht.

3. Vergleichende Betrachtungen der Versuchsergebnisse.

Wenn wir die im vorstehenden Abschnitte zusammengestellten Versuchsergebnisse vergleichend betrachten, so finden wir, daß in bezug auf Streuung die Anordnung die günstigste ist, bei welcher der Widerstand des Nutzweges ein Minimum ist. Mit einer Verkleinerung des magnetischen Widerstandes sinkt naturgemäß die für den verlangten Kraftfluß benötigte und damit auch die auf Streuung wirkende MMK. Das einfachste Mittel, den Streukoeffizienten klein zu halten, ist demnach eine möglichst weitgehende Verminderung des Luftspaltes des Wendepoles. Daß eine solche jedoch andererseits die Stabilität des Wendefeldes ungünstig beeinflusst, wurde durch die Versuche bei Bürstenverschiebung nachgewiesen. Diese Unstabilität des Feldes erstreckt sich gleichfalls auf die durch die Zähne und die Kurzschlußströme hervorgerufenen Feldfluktuationen von hoher Frequenz. Ein Bild von den durch die Zähne hervorgerufenen Feldschwankungen geben die in Fig. 24 dargestellten zwei Feldkurven, die den beiden extremen Stellungen der Zähne zum Wendepol entsprechen. Ein Vergleich der obigen Feldkurve mit denen der Fig. 10 zeigt, daß bei dem auf das doppelte erhöhten Luftspalt die Amplitude der Feldschwingungen um nahezu 50% verkleinert wurde. Die eventuell vorhandene Dämpfung ist dabei nicht berücksichtigt.

Da durch die obigen Bedenken der Verkleinerung der auf Streuung wirkenden MMK bald Grenzen gesetzt sind, so bleibt noch die Möglichkeit offen, durch Verminderung der Leitfähigkeit des Streuweges den Streukraftfluß in mäßigen Grenzen zu halten. Zu

¹⁾ E. Arnold, Gleichstrommaschine, 2. Aufl., Bd. II, S. 287; W. Oehlschlager, ETZ 1907. S. 257.

diesem Zwecke pflegt man dem Kern des Wendepols, wie es auch bei der untersuchten Maschine der Fall ist, eine möglichst geringe axiale Ausdehnung zu geben. Eine Verminderung des Querschnittes für den Streufluß erreicht man gleichfalls durch eine günstige Anordnung der Wicklung des Wendepols. Da die MMK desselben von Null am Joch bis zu seinem Höchstwerte unterhalb der Spule wächst, so ist oberhalb der Spule die auf Streuung wirkende Potentialdifferenz ebenfalls Null. Je kleiner man daher die radiale Spulenlänge macht und je dichter dieselbe über dem Anker angeordnet ist, um so

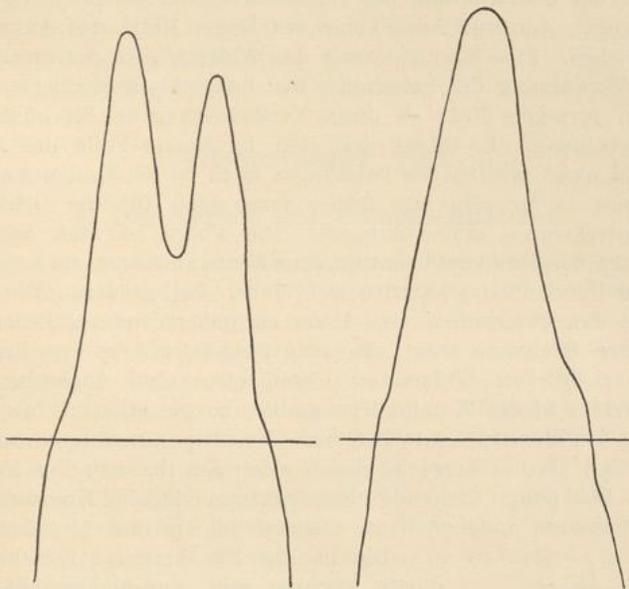


Fig. 24. Feldkurven des Wendepols bei Stellung einer Nut und eines Zahnes unter der Polmitte zur Veranschaulichung der Feldschwankungen infolge der Nuten. Beide Kurven wurden abgesehen von der Zahnstellung unter gleichen Verhältnissen aufgenommen.

geringer ist der Querschnitt des Streuweges und damit unter sonst gleichen Verhältnissen die Streuung. Da auf den unterhalb der Spule liegenden Raum, also vor allem die Polschuhe, die maximale Potentialdifferenz wirkt, und da zugleich die Leitfähigkeit infolge der Nähe der Hauptpolspitzen sehr beträchtlich ist, ist der aus dem Polschuh austretende Streufluß stark ins Gewicht fallend, die axiale Höhe der Polschuhe ist daher möglichst klein zu machen. Diese Gesichtspunkte werden von den meisten Firmen bei der Bewicklung der Wendepole beachtet; die Erfahrung hat von selbst dazu geführt.

Wie aus dem Krafröhrenbild Fig. 29 ersichtlich, beträgt der aus dem Polschuh austretende Streufluß etwa 60% des Gesamtstreufusses bei unverkürzten Polschuhen. Eine Verkürzung der Polschuhlänge verkleinert naturgemäß diesen Prozentsatz; da mit ihr aber zugleich eine Erhöhung der AW-Zahl der Wendepole verbunden ist, so findet eine Verkleinerung des Streufusses nur dann statt, wenn die auf Streuung wirkende Potentialdifferenz nicht vorherrschend vom Luftwiderstand wie bei unbelastetem Anker, herrührt. Bei Belastung des Ankers ist der Teil der Wendepolamperewindungen, der für die Überwindung des Luftwiderstandes aufgewendet wird, klein gegen den zur Aufhebung der Gegen-MMK des Ankers erforderlichen. Eine Verkleinerung des Widerstandes des Streuweges durch Verkürzung des Polschuhes tritt daher bei Belastung — wenn auch in geringem Maße — durch Verkleinerung des Streufusses Φ_s in Erscheinung. Es bildet sich aber in diesem Falle das Ankerquerfeld axial seitlich des Polschuhes auch in der Kommutierungszone aus, es ist also, wie früher festgesetzt, für die Größe des Streukoeffizienten mitbestimmend. Die Folge ist, daß auch bei Belastung der Streukoeffizient größere Werte annimmt, als bei unverkürzten Polschuhen. Es wird sich daher bei größeren Maschinen lohnen, den Polschuhen eine Form zu geben, welche diesen Verhältnissen Rechnung trägt, also eine Gestalt, welche dem Streufluß einen erheblichen Widerstand bietet, ohne eine Ausbildung des Ankerfeldes in der Kommutierungszone zu gestatten. Eine Formgebung des Wendepoles nach diesen Gesichtspunkten ist um so mehr berechtigt, als die Versuche durch eine, den theoretischen Verhältnissen Rechnung tragende Polschuhform ideale Kommutationsverhältnisse zu erzielen, heute ziemlich allgemein aufgegeben sind.

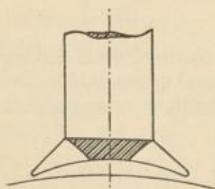


Fig. 25.

Die in Fig. 25 skizzierte Polschuhform dürfte geeignet sein, auf die Streuung und gleichzeitig die Stabilität des Wendefeldes günstig einzuwirken. Mit Rücksicht auf die Kommutation hat M. Breslauer eine Exzentrizität des Wendepol-Luftspaltes empfohlen.¹⁾ Hier soll diese dazu dienen, eine Sättigung der Spitzen zu erzwingen. Hierdurch wird einerseits dem Streufluß der Verlauf durch den Polschuh erschwert, andererseits die Stabilität des Wendefeldes verbessert, indem bei Verzerrung des Feldes der Widerstand der stärker beanspruchten Polspitze infolge der Sättigung wächst, der der entlasteten sinkt und demgemäß ein Ausgleich eintritt.

¹⁾ M. Breslauer, ETZ 1905, S. 645.

Ein solcher wird auch erreicht für die durch die Nuten verursachten Feldschwankungen. Als eine ausgeführte Polschuhform, die nach ähnlichen Gesichtspunkten konstruiert ist, zeigen wir in Fig. 26 einen Wendepol, wie er von der A. E. G. ausgeführt wird. Der Pol ist axial geschlitzt und der Polschuh sehr dünn, so daß der Pol einem Streu- und Querfluß geringe Leitfähigkeit bietet.

Betreffs der Zahl der Wendepole haben die Versuche die Tatsache voll bestätigt, daß eine Verminderung derselben eine erhebliche Ersparnis an Amperewindungen zur Erzielung eines bestimmten kommutierenden Kraftflusses mit sich bringt.¹⁾

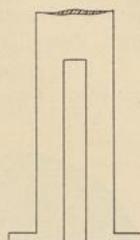


Fig. 26.

Theoretischer Teil.

1. Der Verlauf des Wendekraftflusses.

Bevor wir dazu schreiten können, die Versuchsergebnisse rechnerisch zu verfolgen, ist es notwendig, sich mit der Verteilung des Kraftflusses in der Maschine zu befassen, da wir uns entscheiden müssen, welchen Kraftlinienweg wir der Berechnung der Leitfähigkeiten zugrunde legen wollen.

Die Verteilung des Kraftflusses in einer Maschine mit Wendepolen ist von E. Arnold²⁾ experimentell untersucht worden. Wie dort gezeigt, können, sofern die Sättigung im Joch- und Ankereisen klein und die Maschine ganz symmetrisch gebaut ist, die magnetischen Kreise der Wendepole und der Hauptpole, was die Größe der Kraftflüsse anbelangt, als vollkommen unabhängig voneinander angesehen werden.

Bei unerregten Hauptpolen fließt kein Wendekraftfluß durch die Hauptpole, weil die MMK der benachbarten Wendepole im Hauptpol einander entgegengesetzt gerichtet sind und sich aufheben. Der Verlauf des Wendekraftflusses kann daher bei unerregten Hauptpolen und unerregtem Anker leicht übersehen und die Streuung berechnet werden.

Werden bei gleichfalls unerregtem Anker die Hauptpole erregt, so werden die Verhältnisse weniger einfach. Zu beiden Seiten eines jeden Wendepols entsteht jetzt ein Pol von gewöhnlich weit höherem magnetischen Potential. Der auf einer Seite befindliche

¹⁾ E. Arnold, ETZ 1906, S. 916; M. Breslauer, ETZ 1906, S. 917; Oehlschläger, ETZ 1906, S. 1055; E. Schulz, ETZ 1907, S. 1149; E. Arnold, Gleichstrommaschine, 2. Aufl. Bd. I., S. 588.

²⁾ ETZ 1906, S. 261.