

Badische Landesbibliothek Karlsruhe

Digitale Sammlung der Badischen Landesbibliothek Karlsruhe

**Die Wendepolstreuung und ihre Berechnung auf Grund
experimenteller Untersuchung**

Schimrigk, F.

Berlin, 1909

Theoretischer Teil

[urn:nbn:de:bsz:31-274856](https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:31-274856)

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⁾

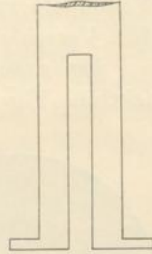


Fig. 26.

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 unerregten 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.

ist gleichnamig, der andere ungleichnamig erregt, und der Wendekraftfluß muß sich jetzt durch die Hauptpole schließen.

Durch die Zusammensetzung der Kraftflüsse der Haupt- und Wendepole erleidet die magnetische Achse der Felder naturgemäß eine Verschiebung.¹⁾

Ein anschauliches Bild dieser Verhältnisse gibt das Eisenfeillichtbild Fig. 27. In diesem repräsentieren die Pole *N* und *S* die

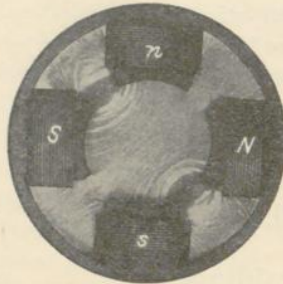


Fig. 27.

Hauptpole einer zweipoligen Maschine, *n* und *s* die Wendepole; von diesen ist *s* ebenso stark erregt als die Hauptpole, *n* dagegen schwächer.

Der Verlauf des Nutz- und Streufeldes ist deutlich sichtbar. Entsprechend der infolge der verschiedenen starken Erregung zwischen *N* und *n* bestehenden Potentialdifferenz sieht man zwischen den Polschuhen von *N* und *n* einen magnetischen Ausgleich, der zwischen den gleich stark erregten Polen *S* und *s* fehlt.

Es möge hier noch ein Versuch mitgeteilt werden, welcher angestellt wurde, um den Einfluß der Hauptpolverregung auf den Verlauf des Streufusses nachzuweisen. Da die Scheidung des Kraftflusses in Streu- und Nutzkraftfluß eine willkürliche nur aus Zweckmäßigkeitsgründen erfolgte ist, bestätigen die Ergebnisse das oben Gesagte.

Eine Prüfspule, welche den gesamten aus einem Wendepol nach einem Hauptpol übertretenden Kraftfluß umschloß, wurde zwischen dem Wendepol und den benachbarten Hauptpolen abwechselnd herausgezogen und die geschnittenen Kraftflüsse nach Größe und Richtung ballistisch festgestellt.

Bei unerregten Hauptpolen wird zu beiden Seiten des Wendepols das gleiche Feld geschnitten.

Werden die Hauptpole erregt, so wächst der Kraftfluß nach dem ungleichnamigen Pol an, nach dem gleichnamigen Pol nimmt er ab.

Die Änderung der Kraftflüsse mit der Hauptpolverregung ist in Fig. 28 aufgetragen. Die Funktion verläuft gradlinig. Um den Betrag, den der Streufluß nach dem ungleichnamigen Pol zunimmt, nimmt der nach dem gleichnamigen ab.

Eine Umkehr der Streuflußrichtung zwischen den gleichnamigen

¹⁾ E. Arnold, ETZ 1906, S. 263.

Polen findet naturgemäß statt, sobald das auf Streuung wirkende Potential des Hauptpols größer wird als das des Wendepols.

Wird bei erregten Haupt- und Wendepolen der Anker belastet, so wird der Verlauf des Flusses nicht wesentlich geändert; seine quantitative Verteilung wird natürlich eine andere. Die Potentialdifferenz des Wendepols gegen den Anker wird um die Ampèrewindungszahl des letzteren verkleinert, daher wird die MMK für den Nutzkraftfluß vermindert, so daß dieser erheblich kleiner wird.

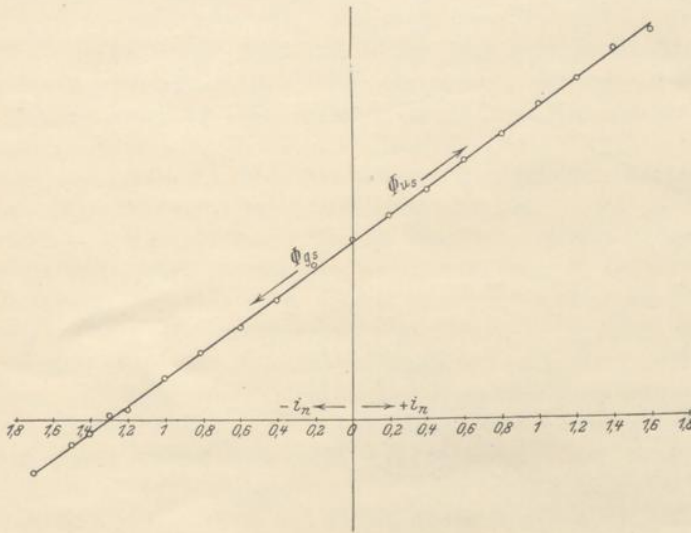


Fig. 28. Einfluß der Hauptpolarerregung auf die Verteilung des Wendepol-Streufusses. Φ_{g_s} Streufluß nach dem gleichnamigen Hauptpol. Φ_{u_s} Streufluß nach dem ungleichnamigen Hauptpol. Die Wendepole sind konstant erregt.

Der nachstehenden Berechnung dürfen wir einen Verlauf des Wendekraftflusses durch die Hauptpole zugrunde legen, obwohl wir im übrigen deren Erregung vernachlässigen.

Dies geschieht, weil der Versuch und die Rechnung zeigen, daß die Wahl des Kraftlinienweges das Ergebnis der Rechnung nur in sehr geringem Maße beeinflusst. Die Annahme eines Verlaufs durch die Hauptpole hat aber den Vorteil, allgemein gültig zu sein, unabhängig von der Zahl der Wendepole.

2. Berechnung der Wendepolstreuung.

Berechnung der Wendepolstreuung bei stromlosem Anker.

Für die Größe des Streukoeffizienten ist in erster Linie das Verhältnis der Leitfähigkeiten der Nutz- und Streuwege bestimmend. Es wurde daher zur Kontrolle der angegebenen Berechnung die

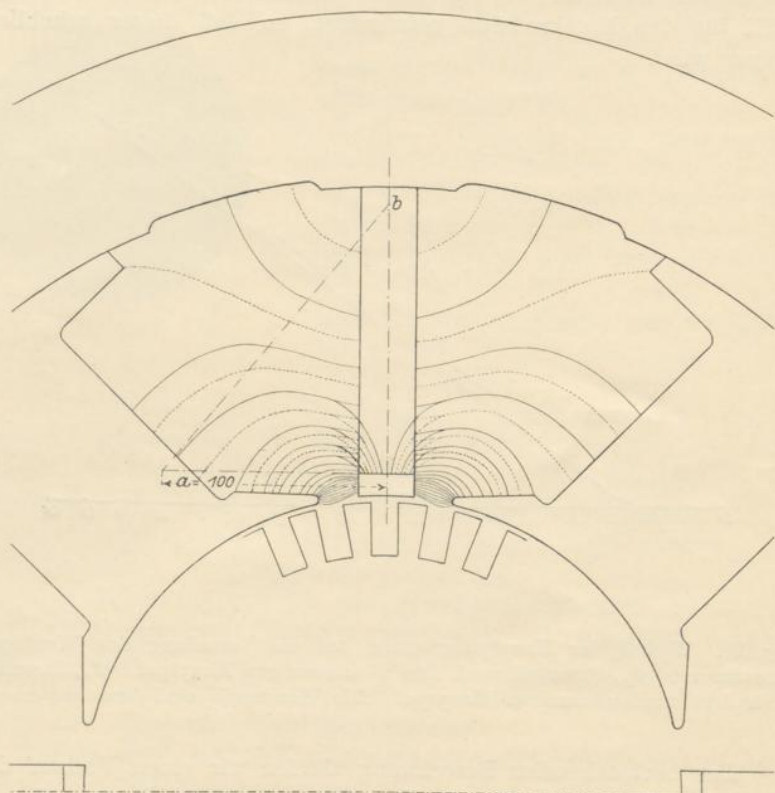


Fig. 29. Kraftlinienbild zur Berechnung der Leitfähigkeit des Streuweges. Die ausgezogenen Röhren geben ein Bild von der Verteilung des Streufusses in radialer Richtung.

Verteilung der aus einem Pol austretenden Kraftströme über die Polhöhe experimentell untersucht. Zum Zwecke dieser Untersuchung wurden die Führungsschienen der großen Meßspule mit Marken in Abständen von 10 mm versehen und verschiebbare und feststellbare Anschläge an den Führungsschienen angebracht. Durch Bewegung der Meßspule vom Joch bis zum jeweiligen Anschlag wurde die Verteilung des Streufusses über die Polhöhe festgestellt. Das

Kraftröhrenbild Fig. 29, das gleichzeitig zur Berechnung der Leitfähigkeit λ_{1x} dient, gibt ein Bild von der auf diese Weise festgestellten prozentuellen Verteilung des Kraftflusses über den Pol. Das Bild ist so gezeichnet, daß jede Röhre den gleichen Kraftfluß darstellt, also einen Kraftfluß, der gleich dem halben Streufluß dividiert durch die Zahl der Röhren ist. Es wurden derartige Messungen für verschiedene Amperewindungsverhältnisse vorgenommen und gefunden, daß diese keinen nennenswerten Einfluß auf die Verteilung ausüben. Bei einer Verkürzung des Polschuhes wird naturgemäß die Zahl der aus ihm austretenden Kraftlinien verkleinert, während sonst die Verteilung dieselbe bleibt. Die Leitfähigkeit der Luftwege wird mit Hilfe eines solchen Kraftröhrenbildes leicht gefunden. Bei ihrer Berechnung ist besonders auf eine richtige Annahme der axialen Länge der Kraftröhren Wert zu legen. Wenn der Wendepol dieselbe axiale Länge wie der Hauptpol hat, sind die bei der Schätzung möglichen Fehler nur gering. Bei kürzerem Wendepol überschätzt man leicht die axiale Ausbreitung der Kraftröhren. Durch Vergleich mit den Messungen wurde gefunden, daß die mittlere Kraftröhrenlänge l_x im vorliegenden Falle nur um etwa 15% größer ist als die Länge des Wendepolkerns. Wenn die Kraftröhren, wie man leicht anzunehmen geneigt ist, sich über die ganze Polbreite des Hauptpols ausbreiteten, so würde eine axiale Verkürzung des Wendepoles sehr geringen Einfluß auf die Größe des Streuflusses haben. Unter Beachtung dieser Verhältnisse gibt das bekannte, von E. Arnold und J. L. la Cour¹⁾ angegebene Verfahren recht genaue Resultate. Der Vollständigkeit halber sei es an dieser Stelle mitgeteilt. Die Leitfähigkeit einer Röhre ist

$$\lambda_{1x} = \frac{4\pi}{10} \cdot \frac{b_x}{\delta_x} \cdot l_x,$$

wenn l_x die mittlere axiale Tiefe, b_x die mittlere Breite des Querschnittes der betrachteten Röhre und δ_x die mittlere Länge der Röhre ist. Die Leitfähigkeit des gesamten Kraftflusses ist dann $\lambda_1 = \sum \lambda_{1x}$ über sämtliche Kraftröhren im Raume. Naturgemäß gibt eine solche Berechnung bei richtiger Annahme von l_x einen zu kleinen Wert, denn der tatsächliche Verlauf der Kraftlinien besitzt ein Maximum an Leitfähigkeit, dem man wohl nahekommen, aber das man mit den groben zeichnerischen Hilfsmitteln nicht erreichen kann. Da jedoch der Streukoeffizient ein Quotient ist und im

¹⁾ E. Arnold und J. L. la Cour, Beitrag zur Vorausberechnung und Untersuchung von Ein- und Mehrphasenstromgeneratoren, Stuttgart 1901, S. 12; E. Arnold, Gleichstrommaschine, 2. Aufl., Bd. I, S. 289 u. S. 566.

Zähler und Nenner der Fehler das gleiche Vorzeichen hat, so geht der Fehler reduziert in den Wert für den Streukoeffizienten ein.

Außer der Leitfähigkeit der Kraftrohrenwege ist zur Bestimmung des Streukoeffizienten die Kenntnis der wirksamen magnetischen Potentialdifferenz erforderlich. Ist die MMK des betrachteten Wendepols gleich AW_w , die der benachbarten Hauptpole gleich $+AW_h$ und $-AW_h$, so bestehen bei unerregtem Anker die magnetischen Potentialdifferenzen $AW_w + AW_h$ gegen den ungleichnamigen Hauptpol, $AW_w - AW_h$ gegen den gleichnamigen Hauptpol.

Bei symmetrischer Anordnung der Wendepole zu den Hauptpolen ist die Leitfähigkeit gegen dieselben die gleiche, sie sei $\frac{\lambda_w}{2}$. Der Gesamtkraftfluß, der aus einem Wendepol bei unerregtem Anker austritt, ist daher:

$$\Phi_w = (AW_w + AW_h) \frac{\lambda_w}{2} + (AW_w - AW_h) \frac{\lambda_w}{2}$$

$$\Phi_w = AW_w \cdot \lambda_w \dots \dots \dots (2)$$

Die Leitfähigkeit der aus einem Pol austretenden Kraftrohren λ_w ist die totale, d. h. die für alle aus dem Pol austretenden Kraftrohren, ohne zwischen Nutz- und Streufluß zu unterscheiden. Es ist also $\lambda_w = \lambda_s + \lambda_a$ und $\Phi_w = \Phi_s + \Phi_a = \Phi_m$. Der Kraftfluß verteilt sich den Leitfähigkeiten direkt proportional, es ist daher

$$\frac{\Phi_s}{\Phi_a} = \frac{\lambda_s}{\lambda_a}$$

und es wird der Streukoeffizient bei unerregtem Anker:

$$\sigma_o = 1 + \frac{\lambda_s}{\lambda_a} \dots \dots \dots (3)$$

Aus der vorstehenden Ableitung ist ersichtlich, daß die Summe der Wirkungen der anderen Pole auf den betrachteten bei symmetrischer Anordnung Null ist. Es ist demgemäß berechtigt, in diesem Falle ihre Erregung zu vernachlässigen und die Leitfähigkeiten so zu berechnen, als ob nur die MMK_s des betrachteten Poles und des Ankers vorhanden wären.

Wir haben bei Ableitung obiger Beziehung angenommen, daß auf Φ_s und Φ_a die gleiche Potentialdifferenz wirksam ist. Das ist in Wirklichkeit jedoch nicht der Fall, sondern auf die Kraftrohren des Streuflusses wirkt eine AW -Zahl, welche radial vom Polschuh nach dem Joch von AW_w bis O abnimmt. Wir müssen also, wenn die Gleichung richtig sein soll, dieser Abnahme bei Berechnung der Leitfähigkeiten Rechnung tragen. Das geschieht in der in Fig. 29 angedeuteten Weise. Macht man in dem eingezeichneten

rechtwinkligen Dreieck die Kathode $a=100$ mm, die Kathode $b=$ der Spulenlänge, so geben, gleichmäßige Verteilung der Wicklung vorausgesetzt, die Längen der Parallelen zu a , gezogen an den Eintrittsstellen der Mittellinien der Krafröhren, durch 100 dividiert den Reduktionsfaktor, welcher die Leitfähigkeit des Luftweges auf konstante AW -Zahl korrigiert. In der nachfolgenden Rechnung bedeuten die eingesetzten Leitfähigkeiten stets auf diese Weise korrigierte Werte, so daß die Verschiedenheit der umschlungenen Amperewindungszahl vernachlässigt werden kann. Streng genommen bedeuten λ_a und λ_s in Gleichung 3 die Leitfähigkeiten für die ganze Länge des Kraftlinienweges. Bei sehr kleinen Sättigungen jedoch kann der Widerstand des Eisenweges vernachlässigt und die Leitfähigkeit des Luftweges allein berücksichtigt werden. Wir können demgemäß die Gleichung schreiben

$$\sigma_o = 1 + \frac{\lambda_{ls}}{\lambda_{la}} \dots \dots \dots (4)$$

Da die Messungen gezeigt haben, daß σ_o nahezu unabhängig von den Sättigungen ist, so ist Proportionalität zwischen λ_s und λ_{ls} , wie λ_a und λ_{la} anzunehmen. Die obige Beziehung ist daher für alle Erregungen richtig, solange die Wendepole symmetrisch zu den Hauptrollen angeordnet sind.

Bei unsymmetrischer Anordnung sind die Leitfähigkeiten der Streuwege nach beiden Hauptpolen verschieden, während die Leitfähigkeit des Nutzweges als unverändert angesehen werden kann.

Der nach dem ungleichnamigen Hauptpol übertretende Streufluß ist dann

$$\Phi_{us} = (AW_w + AW_h) \lambda_{us}$$

nach dem gleichnamigen

$$\Phi_{gs} = (AW_w - AW_h) \lambda_{gs}$$

Es ist der Streufluß

$$\Phi_s = (AW_w + AW_h) \lambda_{us} + (AW_w - AW_h) \lambda_{gs}$$

Der Nutzkraftfluß ist wie früher

$$\Phi_a = AW_w \lambda_a$$

daher:

$$\sigma = 1 + \frac{AW_w (\lambda_{us} + \lambda_{gs}) + AW_h (\lambda_{us} - \lambda_{gs})}{AW_w \cdot \lambda_a} \dots \dots (5)$$

Naturgemäß findet eine Verkleinerung der Streuung statt, wenn $\lambda_{us} < \lambda_{gs}$, also wenn der Wendepol dem gleichnamigen Hauptpol näher steht als dem ungleichnamigen.

Mit Hilfe der Gleichung 4 wurden die Streukoeffizienten der Wendepole für die untersuchten Anordnungen berechnet. Bei 3 mm Luftspalt und einer der Ankerlänge gleichen Polschuhlänge wurde die Leitfähigkeit der Luft für den Streuweg berechnet zu $\lambda_{ts} = 54,6$, des Luftspaltes unter dem Wendepol zu $\lambda_{ta} = 122,5$. Die Leitfähigkeit des Hauptluftspaltes wurde berechnet zu $\lambda_{th} = 935$. Die Leitfähigkeit des Luftweges durch den Hauptpol ist daher:

$$\lambda'_{ta} = \frac{1}{\frac{1}{\lambda_{ta}} + \frac{1}{\lambda_{th}}} = 108.$$

Der Streukoeffizient berechnet sich danach zu

$$\sigma_0 = 1 + \frac{54,6}{108} = 1,505.$$

Die Differenz gegen den mittleren gemessenen Wert beträgt etwa 2⁰/₀. Wird der Luftspalt auf 6 mm vergrößert, so wird die Leitfähigkeit λ_{ts} etwas kleiner. Sie wurde berechnet zu $\lambda_{ts} = 52,8$, λ_{ta} wird naturgemäß auch kleiner, die Berechnung ergab $\lambda_{ta} = 70,4$. Es wird dann $\lambda'_{ta} = 65,5$ unter Berücksichtigung des Luftspaltes des Hauptpoles.

$$\sigma_0 = 1 + \frac{52,8}{65,5} = 1,8.$$

Der mittlere gemessene Wert betrug 1,73. Wird bei einem Luftspalt von 3 mm die Länge des Wendepoles auf die halbe Ankerlänge verkürzt, so vermindert sich bei sonst gleichen Verhältnissen die Leitfähigkeit des aus dem Polschuh austretenden Streuflusses auf nahezu die Hälfte, ebenso aber auch die des Nutzkraftflusses. Für eine überschlägige Berechnung wollen wir beide Leitfähigkeiten um 50⁰/₀ vermindert ansehen.

Die Leitfähigkeit des ganzen Polschuhes betrug aus dem Kraftrohrenbild berechnet:

$$\lambda_{ps} = 35,2$$

$$\frac{\lambda_{ps}}{2} = 17,6$$

Es ist daher:

$$\lambda_{ts} = 54,6 - 35,2 + 17,6$$

$$\lambda_{ts} = 37$$

$$\lambda'_{ta} = \frac{108}{2} = 54$$

$$\sigma_0 = 1 + \frac{37}{54} = 1,685.$$

Der gemessene Wert betrug 1,6.

Etwas weniger einfach als bei stromlosem Anker gestaltet sich die Berechnung der Streuung bei Belastung der Maschine.

Berechnung der Wendepolstreuung bei belasteter Maschine.

In der einleitenden kurzen Betrachtung der Streuungserscheinungen ist eine Gleichung angegeben, welche den Einfluß der Ankererregung auf die Größe des Streukoeffizienten zum Ausdruck bringt.

Diese Gleichung lautet:

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

$\Sigma \lambda_{sx}$ und $\Sigma \lambda_{ax}$ bezeichnen die Leitfähigkeiten der ganzen Kraftlinienwege. Beide sind variabel und schwer zu bestimmen, da sie von der Größe und der Verteilung des Streuflusses und des Nutzkraftflusses, also auch von dem veränderlichen und unbekanntem σ abhängen. Wir müssen daher Vereinfachungen treffen, um die Gleichung in eine brauchbare Form zu bringen. Bei sehr kleinen Sättigungen können wir die Widerstände der Eisenwege vernachlässigen und die totalen Leitfähigkeiten durch die der Luftwege allein ersetzen. Wir dürfen daher die Gleichung schreiben

$$\sigma = 1 + \frac{\Sigma \lambda_{lsx} AW_{wx}}{\Sigma \lambda_{lax} (AW_w - AW_{gx})} \quad \dots \quad (6)$$

indem wir die Einschränkung machen, daß die Gleichung nur für kleine Sättigungen des Kreises gilt.

Indem wir wieder die Streu- und Ankerkraftlinien als mit allen Wendepol- und Anker AW verkettet ansehen und λ entsprechend reduzieren, können wir nach Seite 229 schreiben:

$$\sigma = 1 + \frac{\lambda_{ls} \cdot AW_w}{\lambda_{la} (AW_w - AW_g)}$$

Aus der mitgeteilten Abhängigkeit des Streukoeffizienten von der Belastung ist ein starkes Anwachsen desselben zu ersehen. Dieses findet in der vorstehenden Gleichung keine Berücksichtigung. Die mit ihr berechneten Werte sind also bei Belastung erheblich zu klein.

Wie früher, ist

$$\lambda'_{la} = \frac{1}{\frac{1}{\lambda_{la}} + \frac{1}{\lambda_{lh}}} = \frac{1}{\frac{1}{122,5} + \frac{1}{935}} = 108.$$

$$\lambda_{ls} = 54,6$$

$$\frac{\lambda_{ls}}{\lambda_{la}} = 0,505$$

$$\sigma = 1 + 0,505 \frac{AW_w}{(AW_w - AW_g)}$$

Setzen wir in dieser Gleichung bei konstantem AW_g wachsende AW_w , oder bei konstantem AW_w wachsende AW_g ein und tragen die Werte von σ in Abhängigkeit von $\frac{AW_w}{AW_g}$ auf, so erhalten wir die

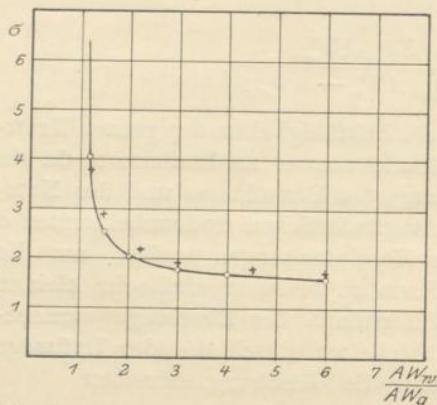


Fig. 30. Streukoeffizient in Abhängigkeit von dem Verhältnis der Amperewindungen des Wendepols zu denen des Ankers. Die ausgezogene Kurve gibt die berechneten Werte an, die Kreuze zum Vergleich die gemessenen. Der Luftspalt des Wendepoles beträgt 3 mm.

in Fig. 30 aufgetragene Kurve. Die für dieselbe Beziehung gemessenen Werte sind gleichfalls eingetragen.

Bei Polschuhen, die kürzer als die Ankerlänge sind, bildet sich das Ankerquerfeld außerhalb des Polschuhes auch in der Kommutierungszone aus, es ist daher in der Gleichung zu berücksichtigen.

Dieses Feld ist

$$\Phi_q = 2\lambda'_q \cdot AW_g$$

In dieser Gleichung ist λ'_q die Leitfähigkeit zwischen der auf einer Seite vom Wendepol infolge seiner Verkürzung nicht überdeckten Kom-

mutierungszone und den Hauptpolen.

Für die Größe von $2\lambda'_q$ ist die nützliche axiale Streuung des Wendeflusses mitbestimmend. Diese ist von dem Verhältnis $\frac{AW_w}{AW_g}$ wiederum abhängig. Für eine überschlägige Berechnung kann jedoch die daraus folgende Veränderlichkeit vernachlässigt werden. Die axiale Ausbreitung des Wendekraftflusses ist schätzungsweise anzunehmen und für die übrigbleibende Ankerlänge ist λ'_q zu berechnen. Für σ entsteht dann die Beziehung:

$$\sigma = 1 + \frac{\lambda_s \cdot AW_w}{\lambda_a (AW_w - AW_g) - 2\lambda'_q \cdot AW_g}$$

Es ist nun streng genommen nicht mehr zulässig, λ_s und λ_a zu ersetzen durch λ_{ls} und λ_{la} , da im Nenner eine Summe steht, die die früher vorhandenen Proportionalität stört.

Jedoch gilt mit genügender Annäherung

$$\sigma = 1 + \frac{\lambda_{ls} \cdot AW_w}{\lambda_{la}(AW_w - AW_g) - 2\lambda'_q AW_g} \dots (7)$$

Die vorstehend gegebenen Gleichungen sind geeignet, ein annäherndes Bild von der Größe des Streukoeffizienten unter Berücksichtigung des Verhältnisses der Amperewindungen des Wendepols zum Anker zu geben. Jedoch ist für ihre Anwendung die Kenntnis dieses Verhältnisses erforderlich. Diese ist bei einer Neurechnung der Maschine nicht vorhanden. Man geht vielmehr aus von der Berechnung des für die Kommutation erforderlichen Kraftflusses und braucht den Streukoeffizienten, um die Amperewindungszahl des Wendepols festzulegen.

Der Streukoeffizient kann nun gemäß der von E. Arnold für die Hauptpole angegebenen Methode¹⁾ und in Übereinstimmung mit dem von ihm über die Verhältnisse bei Wendepolen²⁾ Gesagten berechnet werden. Wie dort gezeigt ist, kommen von der ganzen auf einen Wendepol wirkenden MMK als auf Streuung wirkend die Amperewindungen für die Luft, die Zähne, den Anker, und die zur Aufhebung der Ankeramperewindungen erforderlichen Gegenamperewindungen AW_g in Betracht. Der Rest der Amperewindungen ist erforderlich, um den Fluß durch den beiden gemeinsamen Teil des Kraftrohrenweges zu treiben. Indem wir die Amperewindungen für die Zähne und den Anker vernachlässigen, ist mit guter Annäherung:

$$\Phi_s = (AW_l + AW_g) \lambda_{ls}.$$

Für den Nutzkraftfluß tritt nur die MMK $(AW_w - AW_g)$ in Wirkung.

Unter Bezug auf das Obige ist daher

$$\Phi_a = AW_l \cdot \lambda_{la}.$$

Und es wird:

$$\sigma = 1 + \frac{\lambda_{ls}}{\lambda_{la}} \cdot \frac{AW_l + AW_g}{AW_l} \dots (8)$$

Mit Hilfe dieser Gleichung kann für jede Belastung der Streukoeffizient berechnet werden. Zur Prüfung der Genauigkeit der Berechnung wurde sie für einen Luftspalt von 3 und 6 mm durchgeführt an Hand der gemessenen Magnetisierungskurve. Wir wollen für einen Punkt der Beziehungen die Durchrechnung an dieser Stelle ausführen.

Bei einem Luftspalt von 3 mm war bei $J_a = 24$ und $\frac{AW_w}{AW_g} = 1,5$ gemessen $\Phi_a = 26000$ c. g. s.

¹⁾ E. Arnold, Gleichstrommaschine. 2. Aufl., Bd. I, S. 287.

²⁾ Ebenda S. 566 und 567.

Wir haben berechnet:

$$\lambda_{ls} = 54,6$$

$$\lambda'_{la} = 108.$$

Es ist daher:

$$AW_l = \frac{26000}{108} = 240.$$

Da ferner

$$AW_a = 900,$$

ist

$$\sigma = 1 + \frac{54,6}{108} \cdot \frac{(240 + 900)}{240} = 1 + 0,505 \frac{1140}{250}$$

$$\sigma = 3,4.$$

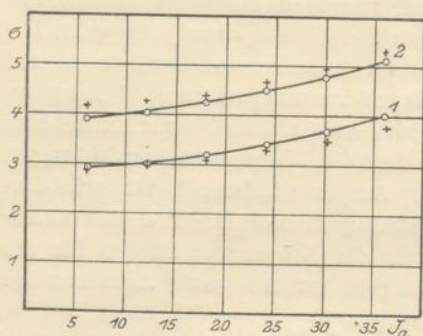


Fig. 31. Streukoeffizient in Abhängigkeit von der Ankerbelastung. Die ausgezogenen Kurven geben die berechneten, die Kreuze zum Vergleich die gemessenen Werte an. Bei Kurve 1 ist der Luftspalt = 3 mm, bei Kurve 2 ist er = 6 mm.

Die Übereinstimmung zwischen den gemessenen und berechneten Werten ist, wie ein Blick auf Fig. 31 zeigt, eine sehr gute. Kurve 1 zeigt den berechneten Streukoeffizienten bei einem Luftspalt von 3 mm, Kurve 2 bei einem solchen von 6 mm. Die gemessenen Werte sind zum Vergleich in der Figur angedeutet.

Bei kürzeren Polschuhen als der Länge des Ankers ist das in der Kommutierungszone außerhalb des Wendepoles sich ausbildende

Ankerquerfeld vom Nutzkraftfluß abzuziehen, um den gleichen Koeffizienten zu erhalten, wie ihn die Messungen ergeben.

Es wird daher:

$$\sigma = 1 + \frac{\lambda_s (AW_l + AW_g)}{\lambda_a AW_l - 2\lambda'_q AW_g}.$$

Der Wert von λ_a für die verschiedenen Belastungen kann aus der Leerlauf-Magnetisierungskurve des Wendepols entnommen werden, wenn man, was annähernd zutrifft, bei gleichem AW_w die Leitfähigkeiten als unbeeinflusst durch die Ankerbelastung ansieht. λ_s bestimmt sich dann annähernd

$$\lambda_s = (\sigma_0 - 1) \cdot \lambda_a.$$

In den meisten Fällen wird es jedoch genügen, in der vorstehenden Gleichung, wie früher, λ_s und λ_a zu ersetzen durch λ_{ls} und λ_{la} , so daß dieselbe lautet:

$$\sigma = 1 + \frac{\lambda_{ls}(AW_l + AW_g)}{\lambda'_{la} \cdot AW_l - 2\lambda'_q AW_g} \dots \dots \dots (9).$$

Auch die Werte, die diese Gleichung gibt, wurden auf ihre Brauchbarkeit geprüft. Fig. 32 zeigt dieselben zum Vergleich mit den gemessenen Werten.

Die für die Bestimmung von σ notwendigen Leitfähigkeiten sind nach dem Seite 31 mitgeteilten Verfahren berechnet, die Leitfähigkeit λ_q für den Ankerquerfluß wurde gefunden zu 15,75 für die ganze Ankerlänge von 120 mm. Setzen wir die ideale Wendepollänge

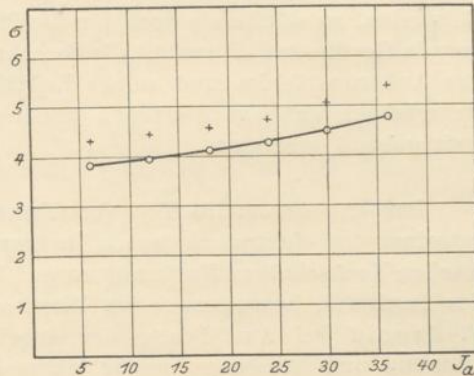


Fig. 32. Streukoeffizient in Abhängigkeit von der Belastung. Die ausgezogene Kurve gibt die berechneten Werte an, die Kreuze zum Vergleich die gemessenen.

$$l_{wi} = l_w + 3 \delta_w^1), \text{ so ist } l_{wi} = 60 + 9 = 69.$$

Es verbleiben für das Ankerquerfeld $120 - 69 = 51$ mm. Die Leitfähigkeit wird daher zu jeder Seite des Wendepoles $\lambda'_q = 3,95$.

Ferner wurden berechnet:

$$\lambda_{ls} = 38,2$$

$$\lambda'_{la} = 61.$$

Für einen Punkt der Kurve von σ geben wir die Durchrechnung.

Bei $J_a = 18$ ist der resultierende Kraftfluß, der in den Anker eintritt, gemessen zu $\Phi_a = 12050$. Dieser sei demnach gleich dem für die Kommutation als erforderlich berechneten. Zur Bestimmung von AW_l vorstehender Gleichung haben wir zu diesem $2\lambda'_q AW_g$ zu addieren.

Es ist $AW_g = 690$

$$2 \cdot \lambda'_q AW_g = 4600$$

$$AW_l = \frac{16670}{63} = 264$$

¹⁾ E. Arnold, Gleichstrommaschine, 2. Aufl. Bd. I, S. 581.

$$\sigma = 1 + \frac{38,2(264 + 690)}{61 \cdot 264 - 6,7 \cdot 690}$$

$$\sigma = 4,14.$$

Ist auch die Annäherung der Berechnungsergebnisse bei verkürzten Polschuhen keine so gute als bei den früher betrachteten Beispielen, so dürfte sie doch für die Praxis vollauf genügen. Denn gerade für diesen Fall enthält die Berechnung durch die Einschließung des Ankerquerfeldes und seiner Leitfähigkeit so beträchtliche Unsicherheiten, daß ein Bestreben nach größerer Genauigkeit als zu weit gehend erscheint.

Der experimentelle Teil vorstehender Arbeit wurde im Laboratorium des elektrotechnischen Institutes der Großherzoglich Technischen Hochschule zu Karlsruhe ausgeführt. — Für die mir von seiten des Institutes, besonders seines Direktors, Herrn Professor Dr. Ing. E. Arnold bei Ausführung der Arbeit zuteil gewordene Unterstützung und Beratung spreche ich meinen besten Dank aus.

Erklärung der verwendeten Buchstaben.

- AW_g = Die auf einen Wendepol entfallenden Gegen-Amperewindungen des Ankers.
- AW_{gx} = Gegen-Amperewindungen des Ankers, die auf eine Kraft-
röhre des Ankerfeldes wirken.
- AW_h = Amperewindungen eines Hauptpoles.
- AW_l = Amperewindungen, die erforderlich sind, Φ_a durch den
Luftweg zu treiben.
- AW_w = Amperewindungen eines Wendepoles.
- AW_{wx} = Amperewindungen eines Wendepoles, die auf eine Kraft-
röhre des Streuflusses wirken.
- b_x = mittlere Breite einer Kraft-
röhre in der Zeichenebene.
- c_b = ballistische Konstante des Galvanometers.
- e_b = dem auf den Bogen reduzierten Strahlenschlag des
Galvanometers.
- J_a = dem Anker zugeführter Strom.
- i_n = Erregerstrom der Hauptpole.
- l_{wi} = ideale Polschuhlänge.
- l_x = axiale Länge einer Kraft-
röhre \perp der Zeichenebene.
- p = halbe Polzahl.
- Q = induzierte Elektrizitätsmenge.
- w = Widerstand des Galvanometerkreises.
- Z = Windungszahl der Meßspule.

- δ_w = Länge einer Kraftröhre in der Zeichenebene.
 λ_a = totale Leitfähigkeit für den Nutzkraftfluß.
 λ_{ax} = totale Leitfähigkeit einer Kraftröhre des Nutzkraftflusses.
 λ_{gs} = totale Leitfähigkeit für den Streufluß nach dem gleichnamigen Hauptpol.
 λ_{us} = totale Leitfähigkeit für den Streufluß nach dem ungleichnamigen Hauptpol.
 λ'_{la} = Leitfähigkeit der Luft für den Nutzkraftfluß für den Weg durch die Hauptpole.
 λ_{la} = Leitfähigkeit der Luft für den Nutzkraftfluß unter dem Wendepol.
 λ_{lax} = Leitfähigkeit der Luft für eine Kraftröhre des Nutzkraftflusses.
 λ_{ls} = Leitfähigkeit der Luft für den Streukraftfluß.
 λ_{lsx} = Leitfähigkeit der Luft für eine Kraftröhre des Streuflusses.
 λ_{lx} = Leitfähigkeit der Luft für eine Kraftröhre.
 λ_{ps} = Leitfähigkeit der Luft für den aus dem Polschuh austretenden Streukraftfluß.
 λ_q = Leitfähigkeit für den Ankerquerfluß.
 λ'_q = Leitfähigkeit für den Ankerquerfluß für eine Seite außerhalb des verkürzten Wendepoles.
 λ_{qx} = Leitfähigkeit einer Kraftröhre des Ankerquerflusses.
 λ_s = totale Leitfähigkeit für den Streukraftfluß.
 λ_{sx} = Leitfähigkeit einer Kraftröhre des Streukraftflusses.
 λ_{us} = totale Leitfähigkeit für den Streufluß nach dem ungleichnamigen Hauptpol.
 λ_w = totale Leitfähigkeit der aus einem Wendepol austretenden Kraftröhren.
 $\sigma = \frac{\Phi_m}{\Phi_a}$ = Streukoeffizient des Wendepoles.
 σ_o = Streukoeffizient des Wendepoles bei stromlosem Anker.
 Φ_a = dem in den Anker tretenden Wendekraftfluß.
 $\Phi_m = \Phi_a + \Phi_s$ = Kraftfluß im Übergang vom Wendepol ins Joch.
 Φ_s = Streukraftfluß des Wendepoles.
 Φ_w = totaler aus einem Wendepol austretender Kraftfluß.

