

Zeitschrift: Bulletin de l'Association suisse des électriciens
Herausgeber: Association suisse des électriciens
Band: 14 (1923)
Heft: 9

Artikel: Zusätzliche Verluste in Synchronmaschinen und ihre Messung
Autor: Rüdenberg, Reinhold
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1057594>

Nutzungsbedingungen

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

Conditions d'utilisation

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

Terms of use

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

Download PDF: 18.01.2025

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

Zusätzliche Verluste in Synchronmaschinen und ihre Messung.¹⁾

Von Reinhold Rüdberg, Charlottenburg.

Bei der Bestimmung des Wirkungsgrades von Synchronmaschinen hat man früher die Zusatzverluste, die sich durch Wirbelstrombildung in den verschiedensten Maschinenteilen ausbilden, oft unberücksichtigt gelassen, weil einwandfreie Messmethoden hierfür nicht bekannt waren.

Im ersten Teil der Arbeit werden die Streufelder, die sich in Synchronmaschinen ausbilden, und die ihren Sitz hauptsächlich im Luftspalt und in den Wickelköpfen sowie in deren Umgebung haben, nach Art und Grösse ihrer Ausbildung zahlenmässig untersucht und deren Vorausbestimmung durch Berechnung zugänglich gemacht.

In einem zweiten Teil wird über die Messung der Zusatzverluste berichtet werden.

Lors de la détermination du rendement des machines synchrones on ne tenait autrefois souvent pas compte des pertes dues aux courants parasites dans les différentes parties de la machine parce qu'on ne connaissait pas de méthode précise pour les déterminer.

L'auteur analyse ces pertes et démontre qu'elles sont surtout dues aux flux de dispersion dans l'entrefer et aux flux de dispersion provenant des têtes des enroulements du stator.

Dans une seconde partie l'auteur parlera des essais entrepris pour vérifier l'exactitude de ses calculs.

Die Energieverluste in Dynamomaschinen setzen sich zusammen aus Reibungsverlusten, Eisenverlusten, Kupferverlusten und einem Rest, den man im allgemeinen nicht näher lokalisieren kann und den man kurz die „Zusatzverluste“ nennt. Die drei ersteren Verluste sind relativ leicht einzeln durch unmittelbare Messung zu ermitteln. Die Zusatzverluste lassen sich dagegen nur durch exakte Messung der zu- und abgeführten Leistung unter voller Belastung der Maschine feststellen. Ihre praktische Bedeutung ist recht erheblich, da sie nicht nur laufende Kosten verursachen, sondern die Maschine heizen und dadurch ihre zulässige Belastung verringern.

Die früheren deutschen und manche ausländischen Maschinennormalien begnügten sich zum Nachweis des Wirkungsgrades einer Maschine im allgemeinen mit der Feststellung der „messbaren Verluste“ durch Einzelmessung und nahmen von den Zusatzverlusten weiter keine Notiz. Die neuen deutschen „Regeln für elektrische Maschinen“ (R. E. M.) schreiben dagegen *die volle Berücksichtigung der Zusatzverluste bei allen Wirkungsgradmessungen* vor, da sich durch ihre Vernachlässigung mancherlei Unzuträglichkeiten ergeben haben, und da es dem heutigen Stande der Elektrotechnik nicht mehr entspricht, eine so wichtige Verlustgruppe einfach totzuschweigen. Für Gleichstrommaschinen, Umformer und Drehstrommotoren ist die Grösse der Zusatzverluste in den R. E. M. durch Mittelwerte von $\frac{1}{2}$ bis 1 % der Nennleistung der Maschine angegeben. Für Synchronmaschinen jedoch sollen die Zusatzverluste *in jedem Einzelfall gemessen* werden. Der Grund hierfür ist einerseits ihr hoher Absolutwert, der bei den grossen heute üblichen Synchrongeneratoren von 1000 bis 60 000 kVA Leistung den Energieverbrauch erheblich beeinflusst, andererseits die Möglichkeit, sie durch eine ebenso einfache Messung festzustellen, wie beispielsweise die Eisenverluste oder Reibungsverluste, und schliesslich der Anreiz, die Konstruktionen im Laufe der Jahre mehr und mehr zu verbessern, um die Zusatzverluste zu verringern.

Bevor wir die Messmethode besprechen, die sich im internen Fabrikbetrieb schon seit vielen Jahren bewährt hat, wollen wir zunächst die verschiedenen Arten der Zusatzverluste und die Stellen, an denen sie sich ausbilden, klarstellen, und wollen einige quantitative Anhaltspunkte über ihre Entstehung gewinnen.

1. Entstehung der Zusatzverluste.

Die *Reibungsverluste* von Dynamomaschinen sind rein mechanischer Art. Sie zerfallen in Lagerreibung, Luft- und Ventilationsreibung und sind im allgemeinen unabhängig von der Belastung. Dabei ist konstante Drehzahl und gute Schmierung

¹⁾ Vortrag im Fachausschuss für Elektromaschinenbau des Berliner elektrotechnischen Vereins am 13. März 1923.

der Lager vorausgesetzt. Die *Eisenverluste* entstehen durch die Ummagnetisierung des aktiven Eisens der Maschine durch das Hauptfeld. Sie werden durch magnetische Hysteresis und elektrische Wirbelstrombildung verursacht und sind *in schwachem Masse abhängig von der Belastung*, weil mit zunehmender Last ein etwas stärkeres Hauptfeld zur Ueberwindung der inneren Spannungsabfälle des Generators erforderlich ist. Anhand der magnetischen Charakteristik oder der Leerlaufspannung von Fig. 1 können wir dies gut verfolgen, wenn wir dort die Streuspannungen der Maschine und die Gegenamperewindungen eintragen, die sich zu dem bekannten Potierschen Dreieck zusammensetzen. Bei $\cos \varphi = 0$ muss man

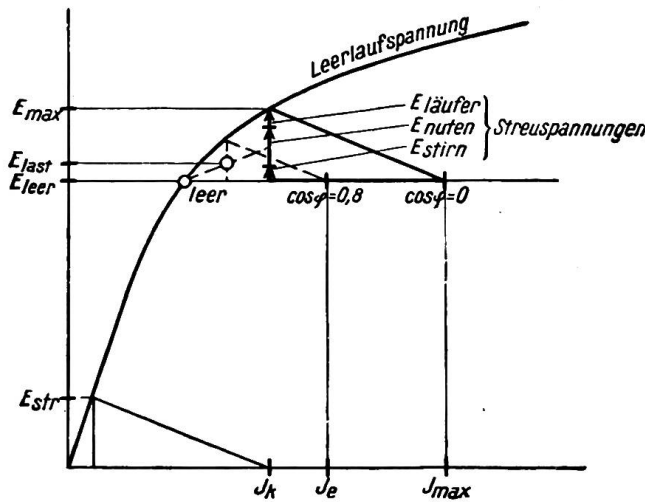


Fig. 1

scheinbar eine *EMK* E_{max} in der Maschine erzeugen, die gleich der Summe der Netz- oder Leerlaufspannung E_{leer} und aller Streuspannungen ist. *Nun bewirkt aber das vermehrte Läuferstreufeld keine Verstärkung des Ständerisensfeldes*, und auch das Nutenstreufeld bewirkt nur eine teilweise Vermehrung des Zahnfeldes und gar keine Vermehrung des Jochfeldes im Ständer. Lediglich die Streuspannung der Stirnverbinder oder Wickelköpfe muss voll und ganz durch ein vermehrtes Eisenfeld überwunden werden. Die Eisenverluste werden daher längst nicht entsprechend der Vergrößerung von E_{leer} auf E_{max} verstärkt, sondern nur um einen Bruchteil hiervon. Bei gutem Leistungsfaktor, z. B. bei $\cos \varphi = 0,8$, sind Streuspannungen

und Ankerrückwirkung wesentlich geringer und können näherungsweise durch die gestrichelte geometrische Konstruktion der Fig. 1 berücksichtigt werden. Die Eisenverluste werden daher bei Belastung nur in quadratischem Verhältnis von E_{last} zu E_{leer} vergrößert. Der Unterschied ist meist nicht gross, und da er überdies wegen der schwierigen experimentellen Trennung der verschiedenartigen Streuspannungen anhand der Prüfung der Maschine nur sehr umständlich errechnet werden kann, so soll er nach den R. E. M. nicht weiter beachtet werden. *Diese Vernachlässigung spielt bei gutem Leistungsfaktor praktisch keine Rolle*. Nur bei schlechtem Leistungsfaktor würde sich manchmal eine kleine Korrektur lohnen.

Die *Kupferverluste* in den Ständer- und Läuferwicklungen sind proportional dem Quadrat der Belastungs- und Erregerströme und dem Widerstand der Wicklungen. Bei starken Leiterquerschnitten kann sich der wirksame Wechselstromwiderstand durch die Wirkung der Nutenstreufelder wesentlich grösser als der Gleichstromwiderstand einstellen. Diese *Vermehrung der Kupferverluste durch Stromverdrängung* können wir seit den Arbeiten von Field²⁾ und seinen Nachfolgern sicher berechnen. Sie ist in der Literatur sehr ausführlich behandelt, da manche Forscher sie anscheinend als die einzigen oder hauptsächlich interessierenden Zusatzverluste betrachten. In der Praxis liegt dies anders, da wir gerade *diese Zusatzverluste* durch

²⁾ A. B. Field. Proc. Am. Inst. El. Eng. 1905, Seite 659.
 M. B. Field. Journ. Inst. El. Eng. 1906, Seite 83.
 F. Emde. E. u. M. 1908, Seite 703.
 W. Rogowski. Archiv für Elektrotechnik 1913, Band 2, Seite 81.
 R. Rüdberg. Archiv für Elektrotechnik 1913, Band 2, Seite 207.
 R. Richter. Archiv für Elektrotechnik 1915, Band 3, Seite 175, und 1915, Band 4, Seite 1.
 J. Fischer-Hinnen. Bulletin des S.E.V. 1917, Seite 101 u. ff.
 H. Rickli. Bulletin des S.E.V. 1917, Seite 125 u. ff.
 H. Rickli. Bulletin des S.E.V. 1922, Seite 341 u. ff.

relativ einfache Mittel weitgehend unterdrücken können. Dagegen bewirken zahlreiche andere Streufelder eine starke Ausbildung von Wirbelströmen in den verschiedensten Teilen der Maschine, die weniger leicht zu vermeiden und deshalb heutzutage wichtiger für die Wirkung der Maschine sind.

In allen Lufträumen in der Nähe des aktiven Materials von Synchronmaschinen bilden sich unter der Wirkung der Belastungsströme magnetische Felder aus. Die hauptsächlich *schädlichen Streufelder* sind in Fig. 2 in das Querschnittsbild der Maschine eingetragen. Es sind *Nutenstrefelder*, *Stirnstrefelder*, sowie *Zahnfelder* und *Oberfelder* im Luftspalt. Alle diese können in den Metallmassen, die sie durchsetzen, starke Wirbelströme erzeugen, die Zusatzverluste entwickeln und dadurch nicht nur unnütze Energieverluste bewirken, sondern auch starke lokale Erhitzung hervorrufen. Wir wollen ihre Entstehung und ihre Wirkungen der Reihe nach betrachten.

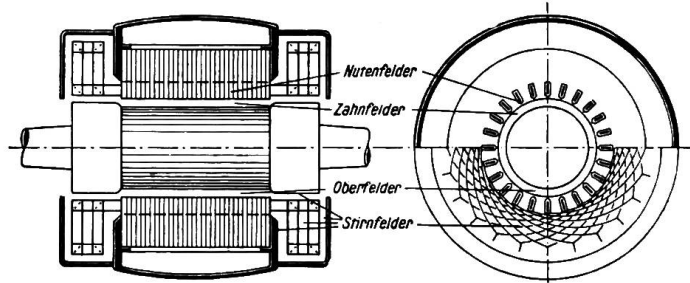


Fig. 2

Das *Nutenstrefeld* wird von den Strömen in jeder einzelnen Nut erzeugt und ist in Fig. 3 dargestellt. Es durchquert die Kupferleiter in der Nut und erzeugt dabei Wirbelströme, die sich den Normalströmen überlagern. Je nach ihrer Richtung addieren oder subtrahieren sich die Wirbelströme zum Betriebsstrom und erzeugen daher eine Stromverdrängung in allen einzelnen Nutenleitern nach dem Aussenrand der Nute zu. Nach innen kann unter Umständen Gegenstrom entstehen. Da die Elementarverluste in jeder Raumeinheit der Leiter quadratisch mit der Stromdichte wachsen, so entstehen durch das *Querfeld* zusätzliche Verluste, die mit dem Quadrat des Streufeldes und daher auch mit dem Quadrat der Nutenstromstärke wachsen. Sie wirken daher ebenso, als ob der Widerstand der Nutenleiter vergrößert wäre. Der *Höchstwert des Nutenquerfeldes im Kupfer* ist

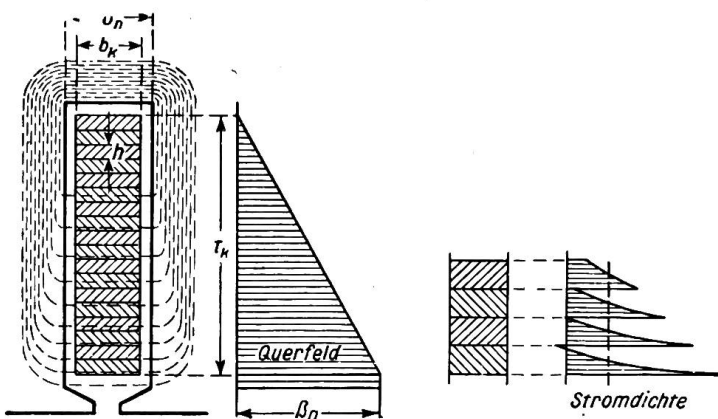


Fig. 3

Das *Nutenstrefeld* wird von den Strömen in jeder einzelnen Nut erzeugt und ist in Fig. 3 dargestellt. Es durchquert die Kupferleiter in der Nut und erzeugt dabei Wirbelströme, die sich den Normalströmen überlagern. Je nach ihrer Richtung addieren oder subtrahieren sich die Wirbelströme zum Betriebsstrom und erzeugen daher eine Stromverdrängung in allen einzelnen Nutenleitern nach dem Aussenrand der Nute zu. Nach innen kann unter Umständen Gegenstrom entstehen. Da die Elementarverluste in jeder Raumeinheit der Leiter quadratisch mit der Stromdichte wachsen, so entstehen durch das *Querfeld* zusätzliche Verluste, die mit dem Quadrat des Streufeldes und daher auch mit dem Quadrat der Nutenstromstärke wachsen. Sie wirken daher ebenso, als ob der Widerstand der Nutenleiter vergrößert wäre. Der *Höchstwert des Nutenquerfeldes im Kupfer* ist

$$B_n = \frac{2 \pi \sqrt{2}}{5} \frac{\vartheta_1}{b_n} A_1, \tag{1}$$

wobei mit b_n die Nutenbreite, mit ϑ_1 die Nutenteilung und mit A_1 der Strombelag am Ständerumfang in A/cm bezeichnet ist. Wir wollen unsere Formeln alle auf ein bestimmtes praktisches Beispiel anwenden, um eine zahlenmässige Wertung zu ermöglichen. Dann ergibt sich

$$B_n = 1,78 \frac{5,2}{2,6} 400 = 1420 \text{ Gauss.}$$

Durch passende Unterteilung der Nutenleiter lassen sich die Stromverdrängungsverluste trotz dieser hohen Kraftliniendichte gering halten, da kein ausreichender Querschnitt für die Wirbelströme mehr vorhanden ist. Die *Höhe der einzelnen Teilleiter*, die ausreichend gegeneinander isoliert und gut verdrillt oder verschachtelt

sein müssen, soll mit den Bezeichnungen der Fig. 3 für Kupferleiter bei Wechselstrom von 50 Per./sec. nicht grösser sein als

$$h = \frac{b_n \sqrt{3}}{b_k t_k} \tag{2}$$

Oberhalb dieser kritischen Höhe würden nicht nur erhebliche Zusatzverluste entstehen, sondern die Gesamtverluste würden sich durch geringeren Kupferaufwand sogar verkleinern lassen. Für ein bestimmtes Beispiel muss sein

$$h \leq \frac{2,6 \sqrt{3}}{1,6 \cdot 8,0} = 0,35 \text{ cm.}$$

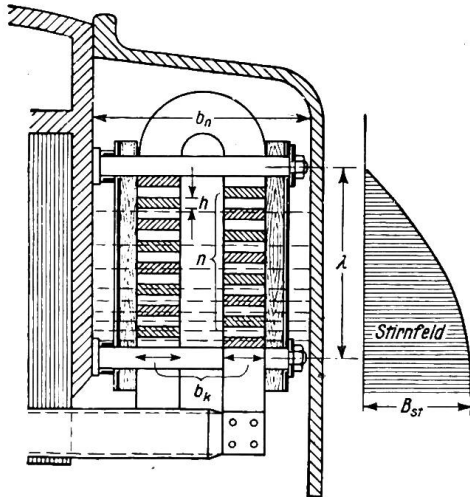


Fig. 4

Man darf also bei tiefen Nuten nur Teileiter von wenigen Millimetern Stärke verwenden.

Das *Stirnstreufeld* wird von den gesamten Wickelköpfen erzeugt. Sein angenäherter Verlauf ist in Fig. 4 dargestellt. Es durchsetzt die Stromleiter ähnlich dem Nutenquerfeld und kann in massiven Stirnverbindern ebenfalls starke Wirbelströme erzeugen, weswegen deren Dicke begrenzt sein muss. Die *grösste Stärke des Stirnfeldes* herrscht am inneren Rande des Wicklungskopfes und ist mit den Bezeichnungen von Fig. 4 angenähert

$$B_{st} = \frac{3 \sqrt{2}}{5} A_1 \sqrt{1 + \left(\frac{\tau}{2 \lambda}\right)^2}, \tag{3}$$

sofern es nicht durch eingebettete Eisenteile lokal noch weiter verstärkt wird. Für das Beispiel erhält man

$$B_{st} = 0,84 \cdot 400 \sqrt{1 + \left(\frac{62}{2 \cdot 25}\right)^2} = 535 \text{ Gauss,}$$

also eine wesentlich geringere Feldstärke als in den Nuten. Man kann übrigens dieses Stirnstreufeld anstatt durch Rechnung auch sehr bequem durch Messung an der fertigen Maschine feststellen, wenn man Wechselstrom durch die Ständerwicklung schickt und *das Feld mit einer kleinen Prüfspule abtastet*, deren Spannung gemessen wird.

Fasst man den Raum des Wicklungskopfes zwischen den Eisenwandungen des Seitenschildes und der Pressplatte des Stators als eine grosse Nut auf, was wegen der Aehnlichkeit der Felddausbildungen nach Fig. 3 und 4, mit einer gewissen Annäherung gilt, so kann man die *zulässige Stärke der massiven Verbindungsbügel* für Kupferleiter bei Wechselstrom von 50 Per/sec abschätzen nach der Beziehung

$$h \leq \sqrt{\frac{b_n \sqrt{3}}{b_k n}}, \tag{4}$$

wobei *n* die Zahl der übereinanderliegenden Bügel ist, die von einem Radialschnitt durch die Maschine getroffen wird. Für das Beispiel gibt das

$$h \leq \sqrt{\frac{40}{12} \cdot \frac{\sqrt{3}}{16}} = 0,60 \text{ cm.}$$

Dickere Bügel als 6 mm würden vermehrte Gesamtverluste hervorrufen. Auch in der Breite darf man die Bügel nicht zu stark machen, da die Stirnkraftlinien sich zum Teil quer durch die Leiter hindurch krümmen und auch dabei die Wirbelströme erzeugen.

Das Stirnstreufeld durchsetzt nicht nur die Kupferleiter, sondern auch *die metallischen Konstruktions- und Versteifungsteile der Wicklung*. Da es am inneren Rande

der Wickelköpfe am stärksten ist, so soll man diese möglichst radial nach aussen legen. Schliesslich tritt das Feld in die *eisernen Pressplatten und Abschlusschilde des Gehäuses* über, durch die es sich zum grossen Teil zurückschliesst. Es kann in allen diesen Teilen starke Wirbelströme erzeugen, welche dieselben erwärmen und unter ungünstigen Umständen sogar bis zur Rotglut erhitzen.

Besonders gefährdet sind alle Kanten und Ecken der eisernen Konstruktionsteile, denn an ihnen konzentrieren sich die Streulinien bis zu hohen Kraftliniendichten. Da nun die Wirbelstromausbildung mit dem Quadrat der Kraftliniendichte wächst, *so entstehen an allen eisernen Kanten besonders grosse lokale Wirbelstromverluste*, die ungewöhnliche Stärke annehmen können, wenn scharfe Ecken von massiven Bauteilen im Streufeld liegen oder wenn das Streufeld quer zur Unterteilung des Eisens laufen kann. Ganz ähnlich, wie man im elektrischen Hochspannungsfeld scharfe Kanten zu vermeiden pflegt, *so muss man auch in starken magnetischen Streufeldern von Wechselstrommaschinen alle Kanten des massiven Eisens mit möglichst grossem Krümmungsradius abrunden*, um lokale Erhitzungen durch Wirbelströme zu vermeiden. Durch diese Erscheinung erklärt sich die hohe Erwärmung, die man häufig an den seitlichen Endblechen des aktiven Eisenpaketes und an deren massiven Pressplatten messen kann.

Sehr wichtig, aber bisher wenig untersucht, sind *die störenden Felder, die sich im Luftspalt der Maschine ausbilden*. Neben dem nützlichen sinusförmigen Felde, das die Hauptspannung erzeugen soll, entstehen bereits bei Leerlauf, vor allem aber bei Belastung, schädliche Zusatzfelder, sowohl bei Turboläufnern wie bei Schenkelpolläufnern, die wir im einzelnen betrachten wollen.

Am ausgeprägtesten sind diese Erscheinungen bei *Turbogeneratoren mit genutetem Zylinderläufer*, was in Fig. 5a schematisch dargestellt ist. Sowohl für die Erzeugung einer sinusförmigen Wechselspannung in der Ständerwicklung bei Leerlauf,

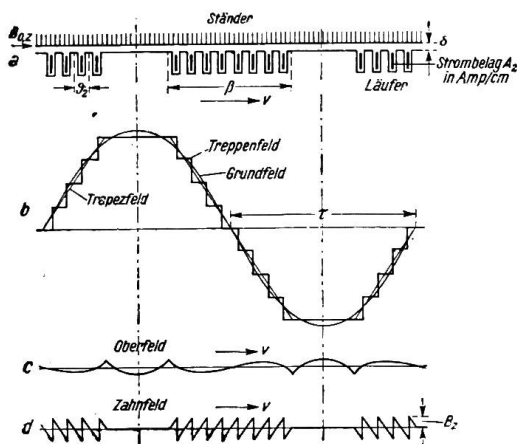


Fig. 5a-d

als auch für die Kompensation des bei Belastung entstehenden Ankerrückwirkungsfeldes der Ständerwicklung würde eine *sinusförmige Feldkurve* des Läufers am günstigsten sein. Man pflegt auch den meisten Maschinenberechnungen diesen sinusförmigen Feldverlauf zugrunde zu legen. In Wirklichkeit erzeugt die Läuferwicklung, die in diskrete Nuten eingebettet ist und dabei ein grösseres Polstück freilässt, jedoch bereits im Leerlauf *eine Treppenkurve des Feldes* nach Fig. 5b. Wir können sie in erster Näherung durch ein *Trapezfeld* ersetzen, durch das wir die einzelnen Treppenstufen ausgleichen, und dieses können wir weiterhin durch sein *sinusförmiges Grundfeld* annähern, mit dem man gewöhnlich die Berechnung der Spannungen und Eisenverluste in der

Maschine durchführt. In Wirklichkeit treten demnach im Luftspalt ausser dem Grundfeld noch *Oberfelder* auf, die in Fig. 5c als Differenz gegenüber dem Trapezfeld eingetragen sind, und ausserdem treten *Zahnfelder* nach Fig. 5d auf, die von der Abweichung des tatsächlichen Treppenfeldes vom Trapezfeld herrühren. Man könnte natürlich auch die gesamte Differenz zwischen Grundfeld und Treppenfeld aufzeichnen, jedoch ist die Trennung nach Fig. 5 für die zahlenmässige Berechnung vorteilhafter.

Sowohl die Oberfelder wie die Zahnfelder hängen am Läufer fest und laufen gemeinsam mit ihm um. Wie man aus Fig. 5c abzählt, überwiegt das fünffache Oberfeld erheblich, jedoch können bei anderen Breiten der Stromzone am Umfang auch andere Oberfelder auftreten. Ihre Frequenz ist

$$f_0 = 3f, 5f, 7f \text{ usw.}, \quad (5)$$

wobei mit f die Umdrehungsfrequenz bezeichnet ist. Die Stärke des fünffachen Oberfeldes ergibt sich zu

$$B_5 = \frac{6}{5} \frac{\tau}{\pi} \frac{A_2}{\delta^2} \quad (6)$$

Es entsteht daher in unserem Beispiel ein zusätzliches Luftspaltfeld von

$$B_5 = 0,38 \frac{62}{0,8} \frac{800}{25} = 940 \text{ Gauss.}$$

Das Zahnfeld hat stets viel höhere Frequenz, nämlich

$$f_z = \frac{2 \tau}{\vartheta_2} f. \quad (7)$$

Das ergibt im Beispiel

$$f_z = \frac{2 \cdot 62}{6,9} 50 = 900 \text{ Per/sec;}$$

es hat also bereits hochfrequenten Charakter. Die grösste Stärke des sägeförmigen Zahnfeldes ist

$$B_z = \frac{\pi}{5} \frac{\vartheta_2}{\delta} \frac{\tau}{\beta} A_2 \quad (8)$$

also im Beispiel

$$B_z = 0,63 \frac{6,9}{0,8} \frac{3}{2} 800 = 6500 \text{ Gauss.}$$

Das Zahnfeld besitzt demnach sehr bedeutende Stärke, wenn die Läuferzahnteilung viel grösser ist als der Luftspalt, wie man es in Turbogeneratoren meistens ausführt.

Diese Zahnfelder treten unabhängig davon auf, ob der Läufer offene, geschlossene oder halbgeschlossene Nuten besitzt, da sie nur durch die Aenderung des Strombelages längs des Umfanges bedingt werden. Offene Nuten erzeugen durch ihren ungleichförmigen magnetischen Widerstand noch weitere Verzerrungen, die aber im allgemeinen gering gegenüber den hier behandelten Zahnfeldern sind.

Sowohl die Oberfelder wie die Zahnfelder bewirken ausser der sinusförmigen Magnetisierung von Zähnen und Joch des Ständers noch überlagerte magnetische Schwankungen mit hoher Frequenz, die sich zwar im Joch schon in geringer Eisentiefe ausgleichen, die aber in den Zähnen starke hochfrequente Spannungen und damit starke Wirbelstromverluste erzeugen. Bereits bei Leerlauf sind diese Zusatzfelder beträchtlich. Fig. 6 zeigt ein Oszillogramm des Leerlauffeldes, das mit einer Prüfspule am Statorumfang aufgenommen wurde, die eine Weite von einer Polteilung besass. Fig. 7 stellt die von diesem Feld in jedem Statorzahn erzeugte Wirbelstrom-

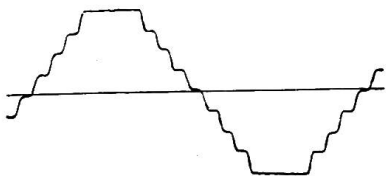


Fig. 6

EMK dar, die durch eine Prüfspule oszillographiert wurde, die einen einzelnen Zahn umschlang. Mit einer Sinuskurve hat dieser Spannungsverlauf nichts mehr zu tun, die Zahn- und Oberfelder drücken ihm vielmehr ihr Gepräge auf. Die Zahnisenverluste sind daher bereits bei Leerlauf wesentlich grösser als bei sinusförmiger Magnetisierung mit der Grundfrequenz.

Bei Belastung muss der Läuferstrom zur Kompensierung des Ständerfeldes stark vergrössert werden. Da jedoch nur die sinusförmigen Grunddrehfelder von Ständer und Läufer restlos aufeinander einwirken, so können sich die Oberfelder und Zahnfelder des Läufers frei ausbilden. Sie bewirken stark verbogene Feldkurven bei Belastung. Ihre Zacken können bei Maschinen mit kleinem Luftspalt und starker Ankerrückwirkung Werte bis zur Grössenordnung des

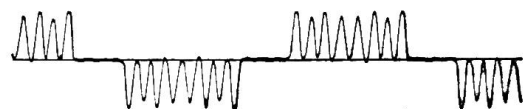


Fig. 7

Hauptfeldes erreichen. Fig. 8 stellt eine *Feldkurve bei Belastung* mit phasenverschobenem Strom dar, in der die überlagerten Felder nach Fig. 5 c und 5 d gut zu erkennen sind.

Am reinsten treten die schädlichen Läuferfelder im Luftspalt hervor beim *Kurzschlusslauf der Maschine*, da dann zur Ueberwindung der inneren Spannungsabfälle der Wicklung nur ein geringes Hauptfeld erforderlich ist. Das Luftspaltfeld besteht alsdann fast nur aus Oberfeldern und Zahnfeldern. Fig. 9 zeigt ein derartiges Oszillogramm, während Fig. 10 den Spannungsverlauf der Prüfspule um einen Statorzahn darstellt, der wegen seiner aussergewöhnlichen Verzerrung eine stark vermehrte Wirbelstrombildung im Zahneisen hervorruft.

Die Stärke und Frequenz der Zusatzfelder bei Leerlauf und Last, und daher die Stärke der *zusätzlichen Ständerzahnverluste*, kann stets nach den Gleichungen (5) bis (8) berechnet werden.

Das vom Ständer erzeugte *Ankerückwirkungsfeld* wird beim Arbeiten mit konstanter Spannung durch vermehrte Erregung des Läufers kompensiert. Nun erzeugen die üblichen Drehstromwicklungen, die nach Fig. 11 sechs Stromzonen am Umfange

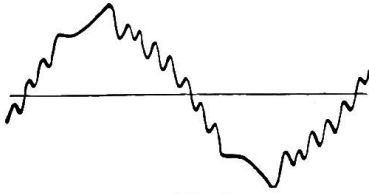


Fig. 8

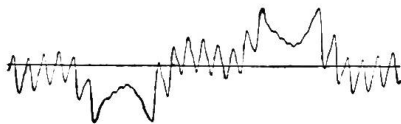


Fig. 9

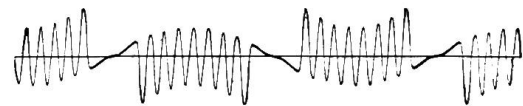


Fig. 10

besitzen, nur im Mittel ein sinusförmiges Ankerfeld, während das *tatsächliche Hauptfeld zwischen zwei extremen eckigen Kurven schwankt*. Sie sind in Fig. 11 für zwei Phasenlagen der Ströme dargestellt und sind durch Rückverschiebung der zweiten Stromdurchflutung in Fig. 11 a zur Deckung gebracht, so dass der Unterschied in Fig. 11 b deutlich hervortritt. Nur das *sinusförmige Grundfeld*, das dem Mittelwert der beiden *Feldbilder entspricht*, kann vom Läufer her durch *vermehrte Erregung kompensiert* werden. Die Oberfelder können sich frei entwickeln und laufen, da sie andere *Geschwindigkeiten als das Grundfeld besitzen*, an der *Läuferoberfläche entlang*. Es entstehen hauptsächlich *fünffache und siebenfache Oberfelder*. Das erstere ist *rückläufig*, das letztere *rechtläufig*. Beide erzeugen im Läufer Spannungen von der Frequenz

$$f_5 = f_7 = 6f, \tag{9}$$

also im allgemeinen von $f_5 = 6 \cdot 50 = 300$ Per/sec. Die *Stärke des fünffachen Oberfeldes* lässt sich berechnen zu

$$B_5 = \frac{6\sqrt{2}}{5\pi} \frac{\tau}{\delta} \frac{A_1}{5^2} \tag{10}$$

und die des *siebenfachen Oberfeldes* zu $B_7 = \frac{5^2}{7^2} B_5 \cong \frac{1}{2} B_5$. (11)

Für das Beispiel ist also $B_5 = 0,54 \frac{62}{0,8} \frac{400}{25} = 670$ Gauss

und $B_7 = 0,5 \cdot 670 = 335$ Gauss.

Da die Stärke der Oberfelder nach Gleichung (10) und (11) ausser vom Strombelag *nur vom Verhältnis des Luftspaltes zur Polteilung abhängt*, so erkennt man, dass

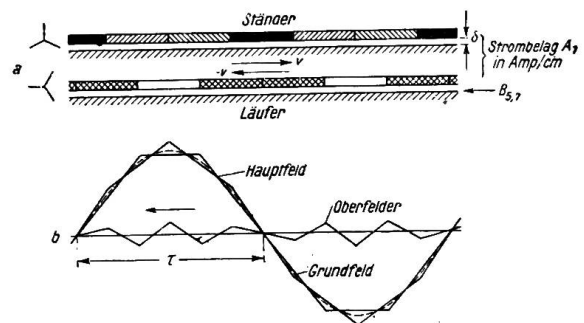


Fig. 11 a und b

sie bei einer bestimmten Maschine nur durch Ausführung mit grossem Luftspalt gering gehalten werden kann. Bedenkt man, dass diese Oberfelder mit grosser Geschwindigkeit über die metallische Läuferfläche eilen und dort *im Eisen und in den Nutenkeilen hochfrequente Wirbelströme hervorrufen*, so versteht man, dass sie häufig zu starker Verlustbildung und erheblicher Erwärmung Anlass geben.

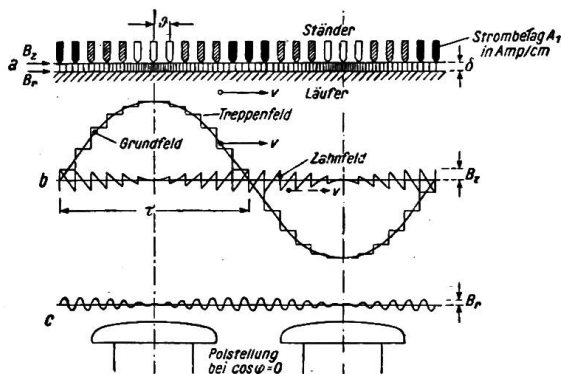


Fig. 12a-c

In Wirklichkeit fliesst der Strom im Stator nicht gleichförmig über den Umfang verteilt, sondern *in diskreten Nuten*, die offen oder halbgeschlossen sein können, so wie es in Fig. 12 dargestellt ist. Selbst wenn wir die Ständerwicklung mit zeitlich idealem Sinusstrom speisen würden und sie räumlich so verteilen, dass sie ein sinusförmiges Grundfeld nach Fig. 11 ergäbe, so würde doch in Wirklichkeit durch die einzelnen Nuten und Zähne ein *Treppenfeld* nach Fig. 5b

entstehen. Ausser dem sinusförmigen Grundfeld, das vom Läufer kompensiert wird, *entsteht dadurch noch ein überlagertes Zahnfeld in Form einer Sägenkurve, dessen Sägezähne fest im Raum liegen und zwar an den Stellen, wo sich die Ständernuten befinden, während sich die Amplitude der Zähne wellenförmig mit dem Läufer fortpflanzt*. Die grösste Amplitude dieses Zahnfeldes lässt sich berechnen zu

$$B_z = \frac{\pi \sqrt{2}}{5} \frac{\vartheta_1}{\delta} A_1 \tag{12}$$

Sie ist für unser Beispiel $B_z = 0,89 \frac{5,2}{0,8} 400 = 2300$ Gauss.

In dieser grossen Stärke besteht das Zahnfeld allerdings nur am Statorumfang. Bei Polstellung für $\cos \varphi = 0$ herrscht sein höchster Wert in der neutralen Zone, während es in Polmitte durch Null geht. Nach dem Läufer zu ist das Zahnfeld bei grossem Luftspalt abgedämpft, wie es Fig. 12c zeigt. *Am Läufertrand* ist es nur noch

$$B_r = \frac{4 \pi \sqrt{2}}{5} \frac{A_1}{\sinh\left(2 \pi \frac{\delta}{\vartheta_1}\right)} \tag{13}$$

Es ist also *eine komplizierte Funktion des Verhältnisses von Luftspalt durch Zahnteilung*. Für das Beispiel wird

$$B_r = 3,55 \frac{400}{\sinh\left(2 \pi \frac{0,8}{5,2}\right)} = 1260 \text{ Gauss,}$$

also nur etwa halb so stark wie am Statorrand. Dieses Sägefild erzeugt ebenfalls hochfrequente Wirbelströme in der Läuferoberfläche von einer Frequenz

$$f_z = \frac{2 \tau}{\vartheta_1} f, \tag{14}$$

also im Beispiel von $f_z = \frac{2 \cdot 62}{5,2} 50 = 1400$ Per/sec.

Bei Schnellläufern können demnach Frequenzen von mehreren tausend Per/sec auftreten. Diese Wirbelströme wachsen quadratisch mit der Feldstärke an und werden daher bei grossen Zahnteilungen des Ständers sehr stark. Fig. 13 stellt die Abhängigkeit

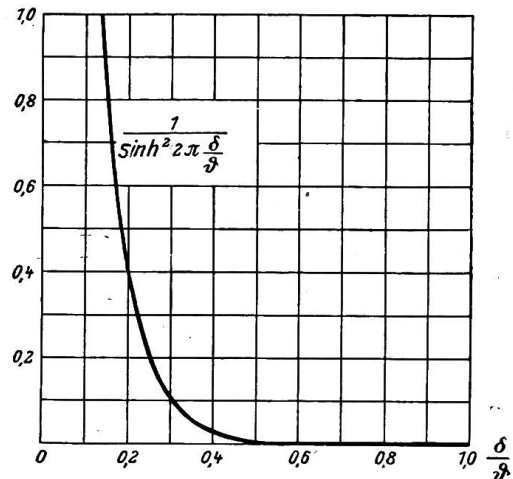


Fig. 13

der Verluste von dem genannten Verhältnis der Gleichung (13) dar. Man sieht, dass der Luftspalt mindestens 40 % der Ständerzahnteilung betragen soll, wenn man geringe Verluste erzielen will. Kann man dies nicht durchführen, so muss man die Rotorpolshuhe aus lamelliertem Blech aufbauen, da in massiven Eisenteilen sonst enorme Wirbelströme erzeugt würden, die sie bis zu hellen Anlauffarben erhitzen können.

Man kann die von den Oberfeldern und Zahnfeldern des Ständers im Läufer erzeugten Wirbelspannungen messen, wenn man Prüfdrähte längs der Läuferoberfläche anbringt und deren Spannung oszillographiert. Im Prüffelde sind sie am leichtesten im Kurzschlusszustand der Maschine zu messen. Fig. 14 zeigt die Spannung zweier Prüfspulen, deren eine in der Polmitte, deren andere in der neutralen Zone des Läufers befestigt war. Wegen der grossen Phasenverschiebung bei Kurzschlusslauf treten nach Fig. 12 in der Polmitte nur schwache Zahnfelder hervor. Die Oberfelder von sechsfacher Frequenz überwiegen hier vollständig. In der neutralen Zone dagegen spielen auch die Zahnfelder eine starke Rolle.

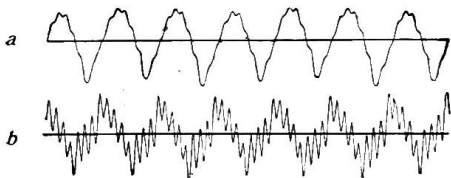


Fig. 14

a Spannung der Prüfspule in der Polmitte.
b Spannung der Prüfspule in der neutralen Zone.

Es lässt sich nachweisen, dass bei Vierlochwicklungen die Wirbelstromverluste an der Läuferoberfläche durch Zahnfelder und Oberfelder die gleiche Grössenordnung besitzen, sofern der Läufer eine gleichförmige, massive eiserne Oberfläche besitzt. Bei stärkerer Nutenunterteilung überwiegt die Wirkung der Oberfelder, bei geringerer Nutenunterteilung tritt sie gegenüber den Zahnfeldern zurück. Bei Lamellierung der Läuferoberfläche ist die wirbelstrombildende Wirkung der Zahnfelder nur gering, falls man die Lamellierung ausreichend tief ausführt und falls man ihnen nicht etwa durch eingelegte Dämpferstäbe oder Metallkeile trotzdem eine Möglichkeit zur Wirbelstromerzeugung bietet.

Führt man die Nuten des Ständers nicht geschlossen oder halbgeschlossen, sondern ganz offen aus, so überlagern sich den hier besprochenen Zahnfeldern noch magnetische Schwankungen, die von dem ungleichförmigen magnetischen Widerstand der Ständeroberfläche herrühren. Sie sind im wesentlichen bereits bei Leerlauf der Maschine vorhanden und bewirken schon da eine starke Verlustbildung und Erhitzung der Läuferoberfläche, die bei geringem Luftspalt im Verhältnis zur Nutenbreite leicht unzulässige Werte erreichen kann³⁾. Aehnliche Zahn- und Oberfelder wie im Luftspalt der Maschine bilden sich auch über den umlaufenden Kappen oder Bandagen des Läufers aus, die dessen Wicklungsköpfe tragen. Nur sind die Felder hier im allgemeinen viel schwächer, weil ihnen kein Ständereisen zu ihrer Ausbildung zur Verfügung steht. Stellt man die Wicklungskappen aus unmagnetischem Material her, so werden die Wirbelströme auf unschädliche Beträge reduziert.

Bei Belastung der Maschine überlagern sich alle die bisher genannten Felder. Die sinusförmigen Grundfelder von Ständer und Läufer kompensieren sich zum grossen Teil. Es bleibt nur ein sinusförmiges Hauptfeld übrig, das nützliche Arbeit leistet und dabei die Eisenverluste im Ständer hervorruft. Alle Oberfelder und Zahnfelder der Ständer- und Läuferwicklung können sich jedoch frei entwickeln, sie laufen durcheinander und erzeugen jedes für sich seine zusätzlichen Verluste. Die Ständerfelder erzeugen Wirbelstromverluste im Läufer, die bis auf Änderungen der Permeabilität des Eisens nur vom Ständerstrom abhängen und daher bei Kurzschlusslauf ebenso gross sind wie bei voller Belastung der Maschine. Die Läuferfelder erzeugen Wirbelstromverluste im Ständer, und zwar ist der Ueberschuss der Läuferzahn- und Oberfelder bei Belastung über ihren Wert im Leerlaufzustand fast ebenso gross, wie die Stärke dieser Felder beim Kurzschlusslauf der Maschine. Daher sind auch die Zusatzverluste durch die störenden Läuferfelder im Kurzschlusslauf annähernd ebenso gross wie bei normalem Betriebe.

Insgesamt sind daher die zusätzlichen Verluste bei Belastung von Synchronmaschinen annähernd gleich den zusätzlichen Verlusten beim Kurzschlusslauf der

³⁾ R. Rüdberg, E. T. Z. 1905, Seite 181.

Maschine, die sich leicht bestimmen lassen, wenn man von den gesamten Verlusten bei Kurzschlusslauf die Reibungsverluste und die regulären Stromwärmeverluste abzieht.

Da die parasitären Zahn- und Oberfelder von Ständer und Läufer nach den obengenannten Formeln um so stärker sind, je kleiner der Luftspalt im Verhältnis zu den Nutteilungen und zur Polteilung ist, und da man bei Langsamläufern auf kleine, bei Schnellläufern auf grosse Polteilung geführt wird, so treten diese Zusatzverluste bei Schnellläufern stärker hervor als bei Langsamläufern. Auch die Stirnstreifelder bilden sich bei grosser Polteilung wegen der zahlreicheren Stromleiter meist stärker aus als bei kleiner und wirken in der gleichen Richtung. Schliesslich sind die regulären Kupferverluste bei Schnellläufern stets viel kleiner als bei Langsamläufern, so dass das Verhältnis von Zusatzverlusten zu regulären Kupferverlusten bei Langsamläufern keine übermässige Rolle spielt, jedoch bei Schnellläufern so ausschlaggebend wird, dass es den Aufbau und die Kühlanordnung der Maschine vorherrschend bestimmen kann.

Fortsetzung folgt.

Eine allgemeine Formel zur Berechnung der Temperatur von elektrischen Heizdrähten.

Von Prof. A. Imhof, Ingenieur, Winterthur.

Der Autor gibt eine teilweise theoretische, teilweise durch experimentelle Untersuchungen erhaltene Formel an zur Bestimmung der Temperatur von in ruhiger Luft geradlinig ausgestreckten oder spiralförmig aufgewundenen Widerstandsdrähten bei gegebener Strombelastung.

Eine von ihm nachkontrollierte Tabelle der wichtigsten Konstanten solcher Drähte ergänzt die Arbeit.

L'auteur donne une formule théorique et vérifiée par la pratique pour le calcul de la température d'un fil rectiligne et d'un fil spiralisé tendu dans l'air en fonction du courant qui le traverse.

Il ajoute un tableau donnant les principales constantes des fils employés couramment dans la fabrication des appareils de chauffage.

Bei der Berechnung von Widerständen und Heizkörpern, die aus in Luft gespanntem oder spiralförmig aufgewickelm Widerstandsdraht bestehen, interessiert in erster Linie der Zusammenhang zwischen Stromstärke und Drahttemperatur. Die Anwendung der Erwärmungsgesetze führt, weil sich die verschiedenen Einflüsse auf den Draht doch nicht richtig berücksichtigen lassen, meist zu durchaus falschen Resultaten. Für jedes Drahtmaterial musste man bisher Vorversuche machen und viele Drahtlieferanten gaben Tabellen heraus, in denen die Stromstärken zur Erreichung verschiedener Temperaturen abgelesen werden können oder wo auch nur die maximal zulässige Stromstärke angegeben ist.

Für die vorliegende Arbeit wurde zunächst eine grosse Zahl von Tabellen gesammelt, wie sie von den Drahtlieferanten herausgegeben werden. Wo die systematische Bearbeitung dieser Tabellen auf unwahrscheinliche Angaben schliessen liessen, wurden eigene Temperaturmessungen vorgenommen mit Hilfe eines optischen Pyrometers, System Holborn und Kurlbaum. Versuche, Salzperlen von bekanntem Schmelzpunkt oder Thermolemente zu verwenden, sind durchaus negativ ausgefallen, wenigstens für dünne Drähte. Für recht dicke Drähte können feine Thermolemente allerdings vorteilhaft angewandt werden, ohne dass aber davon Gebrauch gemacht wurde. Die Messungen und die vergleichenden Betrachtungen eines sehr grossen Zahlenmaterials zeigten, dass eine Reihe von Tabellen als recht zuverlässig betrachtet werden können.

Folgende Gesetzmässigkeiten liessen sich klar herauschälen:

1. Für konstante Drahttemperatur ist mit sehr guter Annäherung

$$I^2 \cdot \varrho = K \quad K = \text{Konstante}, \quad (1)$$

wo ϱ = spezifischer Widerstand (1 m Länge, 1 mm² Querschnitt) und I = Stromstärke in Ampere, die durch den Draht fliesst. Das war zu erwarten, denn die produzierte Wärmemenge ist $Q = \text{Konstante} \cdot I^2 R$. Die Abkühlungsverhältnisse sind bei allen sogenannten Widerstandsdrähten ähnliche. Die Wärmeleitung von innen