

**Badische Landesbibliothek Karlsruhe**

**Digitale Sammlung der Badischen Landesbibliothek Karlsruhe**

**Die Eisenverluste in elliptischen Drehfeldern**

**Radt, Martin**

**Berlin, 1911**

II. Experimenteller Teil

[urn:nbn:de:bsz:31-274924](https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:31-274924)

Wir haben also zur Berechnung der zusätzlichen Verluste nur der für Kreisfeld abgeleiteten Formel noch das Korrektionsglied  $\frac{1}{2}(k^2 + 1)$  hinzuzufügen. Da dieser Faktor der gleiche ist, wie der zur Berechnung der Wirbelströme im Stator abgeleitete Ausdruck, können wir die in Fig. 5, I gezeichnete Kurve auch hier zur Berechnung der Verluste benutzen.

## II. Experimenteller Teil.

### 8. Die Versuchsanordnung.

Die Messungen wurden an einer von der Maschinenfabrik Eßlingen für diesen Zweck besonders gebauten Versuchsmaschine vorgenommen. In Fig. 17 ist die Maschine im Schnitt dargestellt. Sie besteht aus dem Stator eines gewöhnlichen dreiphasigen Induktionsmotors von 5 PS und einem Rotor, der weder Wicklung noch Nuten besitzt. Durch diese Anordnung erreicht man, daß die magnetischen Verhältnisse eines normalen Motors innegehalten werden, daß aber die für die vorliegende Untersuchung besonders störenden zusätzlichen Verluste sehr klein sind. Sie bestehen hier nur aus den an der Oberfläche des Rotors auftretenden Oberflächenverlusten.<sup>1)</sup> Um ferner Wirbelstromverluste in den massiven Eisenteilen des Rotors möglichst zu vermeiden, sind die Rotorbleche allseitig von Holzteilen gefaßt. Der Motor besitzt Kugellager, so daß plötzliche geringe Änderungen der Lagerreibung, wie sie in Gleitlagern vorkommen können, nicht zu befürchten sind. Der Stator ist 6polig, besitzt Spulenwicklung mit 117 Windungen in einer Phase und ist für 110 Volt Phasenspannung gebaut. In jeder Nut liegen 13 Leiter von 2,5 mm Durchmesser. Der Luftspalt ist 0,5 mm, die Nutenöffnung 2,5 mm, die Nuttiefe 26 mm, die Nutbreite 8,5 mm, die gesamte Nutzahl 54. Die Blechstärke beträgt in Stator und Rotor 0,5 mm.

Zur Erzeugung eines Wechselfeldes wurden 2 Statorphasen in Serie geschaltet. Ein elliptisches Drehfeld entstand, wenn man noch der dritten Phase eine 90° zur ersten Spannung phasenverschobene Klemmenspannung aufdrückte. Das elliptische Feld wurde also zweiphasig erzeugt, wobei allerdings durch die ungleiche Verteilung der beiden Phasen über die Polteilung eine Unsymmetrie entstand.

<sup>1)</sup> Bragstad und Fraenckel a. a. O.

Zur Bestimmung der Verluste müssen die dem Stator elektrisch und die dem Rotor mechanisch zugeführten Leistungen gemessen

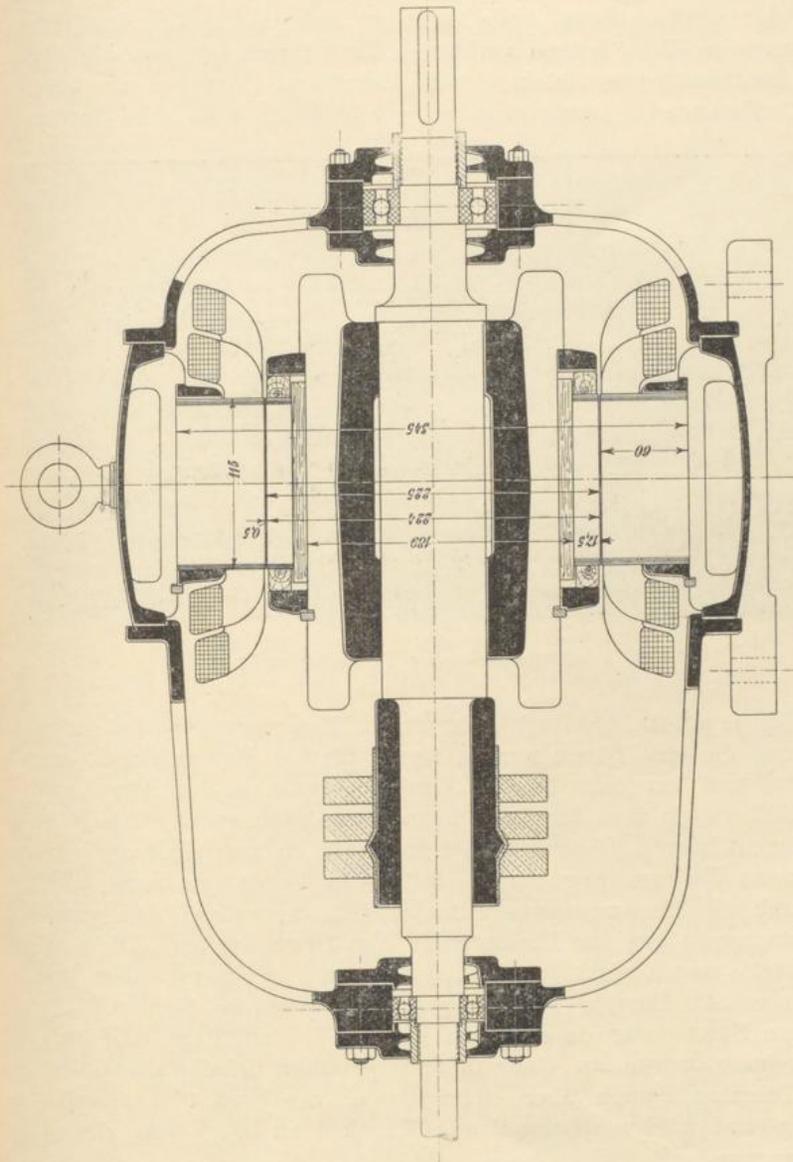


Fig. 17. Längsschnitt durch die Versuchsmaschine.

werden. Zur genauen Bestimmung der zuletzt genannten Verluste war der Rotor mit dem ihn antreibenden Gleichstrommotor durch

eine Spiralfeder gekuppelt, aus deren Verdrehung das übertragene Drehmoment bestimmt wurde. Diese Meßmethode ist vor einigen Jahren von E. Arnold angegeben worden.<sup>1)</sup> Auf der antreibenden und der angetriebenen Welle befindet sich je ein Kontaktstück, das mit der Welle leitend verbunden ist. Durch Bürsten, die auf den Kontaktstücken schleifen, wird der Strom einer Batterie über ein Meßinstrument jedesmal dann geschlossen, wenn die Bürsten

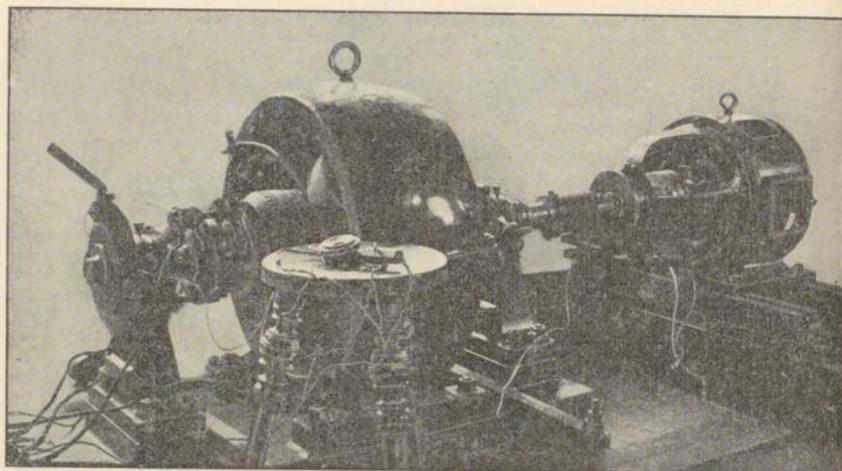


Fig. 18. Gesamtansicht der Versuchsanordnung.

die Kontaktstücke gleichzeitig berühren. Man verschiebt bei jeder Messung die eine Bürste nun so lange, bis das Meßinstrument anspricht, und hat dann in dem Verdrehungswinkel der Bürste aus der Nullage ein Maß für das übertragene Drehmoment. Als Meßinstrument wurde bisher ein Galvanometer benutzt. Bei der vorliegenden Untersuchung wurde dafür ein Telephon verwendet, wodurch die Messungen wesentlich erleichtert werden. Die ganze Anordnung ist aus der Photographie Fig. 18 zu ersehen. Die Kontaktstücke waren nicht ganz 1 mm breit und in Fiberscheiben eingelassen. Als Bürsten wurden schmale Silberstücke benutzt. Die vordere Bürste war durch einen Handgriff verstellbar, und ihre Verdrehung wurde an einer in  $360^\circ$  geteilten Scheibe abgelesen. Das Telephon sprach über einen Bereich von etwa  $1^\circ$  an, wobei ein an- und wieder abschwelldendes Knacken zu hören war, dessen

<sup>1)</sup> Eine Konstruktionszeichnung befindet sich u. a. in Ottenstein, Die Wirbelstromverluste in massiven Armaturkupferleitern, Voitsche Sammlung elekt. Vorträge, Bd. V.

Maximum sich deutlich erkennen ließ. Sehr schön ließen sich auch Pendelungen der Feder beobachten.

Es wurde nun jedesmal der gewünschte magnetische Zustand im Motor hergestellt und die zugehörige Bürstenstellung ermittelt. Dann wurde der Strom im Stator unterbrochen und die neue Stellung der Bürste beobachtet. Die so gefundene Verdrehung der Feder war dann ein Maß für das zur Deckung der Eisenverluste übertragene Drehmoment. Bei dieser Methode ist man von der Größe der Reibung unabhängig, falls man davon absieht, daß in der kurzen Zeit zwischen den beiden Messungen sich die Reibung etwas ändern kann, und daß die Reibung in der belasteten und der unbelasteten Maschine z. B. durch einseitigen magnetischen Zug möglicherweise eine andere ist.

Die Eichung der Kupplungsfeder wurde bisher im ruhenden Zustande vorgenommen, indem man annahm, daß der Einfluß der in der rotierenden Feder auftretenden Zentrifugalkräfte zu vernachlässigen sei. Da aber diese Vermutung nicht ohne weiteres plausibel erschien, wurde die folgende einfache Methode ausgebildet, die es gestattet, die rotierende Feder zu eichen. Es wurde auf die Welle des Versuchsmotors eine Wirbelstrombremse aufgesetzt und bei verschiedenen, jedesmal konstant gehaltenen Tourenzahlen eine Belastungsreihe aufgenommen. Die Messung erfolgte in der eben beschriebenen Weise, so daß die Größe der Lager- und Luftreibung nicht in Betracht kam. Auf diese Weise erfolgte eine direkte Abgleichung des von der Feder übertragenen Drehmomentes. Man hat hierbei noch den großen Vorteil, daß man unabhängig von technischen Instrumenten nur unter Verwendung von Gewichten ein Verfahren zur Messung von zugeführter Leistung besitzt, also fast absolut genaue Bestimmungen machen kann.

Die so durchgeführten Versuche haben ergeben, daß zwar innerhalb der für die vorliegende Untersuchung in Betracht kommenden Drehmomente bei jeder Tourenzahl Proportionalität zwischen Federverdrehung und Drehmoment herrscht, daß aber mit wachsender Tourenzahl bei gleichem Drehmoment die Verdrehung größer wird. In der folgenden Tabelle ist zusammengestellt, wieviel mmkg 1° Verdrehung der Feder bei verschiedenen Tourenzahlen entspricht.

Tourenzahl $n$	1° = mmkg	Tourenzahl $n$	1° = mmkg
300	2,90	800	2,70
400	2,85	900	2,66
500	2,80	1000	2,63
600	2,76	1100	2,60
700	2,73	1200	2,59

Rad t, Eisenverluste.

3

Die zu den Versuchen benutzte Feder war 5 mm stark. Eine dickere Feder zeigte dieselben Erscheinungen, wenn auch nicht ganz so deutlich.

Die durch die Feder übertragenen Watt berechnen sich zu

$$\text{Watt} = \frac{\vartheta \cdot n}{974}.$$

Bei 300 Umdrehungen entspricht also 1° Verdrehung 0,9 Watt, bei 1200 Umdrehungen 3,2 Watt. Da man  $\frac{1}{2}^\circ$  noch sicher ablesen kann, ist die Genauigkeit der Meßmethode sehr gut.

Zur Bestimmung der Induktion im Luftspalt wurde der Rotor mit einer Prüfspule versehen, die eine Polteilung umfaßte. Sie bestand aus 12 Windungen Emailedraht von 0,25 mm Durchmesser und lag in einer Nut von etwa 1 mm Breite und 2 mm Tiefe. Die induzierte EMK wurde teils mit einem Westonvoltmeter von 150 Ohm Widerstand, teils mit einem Spiegelinstrument von mehreren 1000 Ohm Vorschaltwiderstand gemessen, so daß der Spannungsabfall des Meßstromes zu vernachlässigen war. Bei verschiedenen Sättigungen wurde oszillographisch die Kurve der EMK in der Prüfspule aufgenommen und daraus der Formfaktor der Welle bestimmt. Da die Sättigungen, um die Feldform nicht zu verzerren, klein gehalten wurden, änderte sich der Formfaktor von der größten bis zur kleinsten Sättigung nur um 1%.

### 9. Die Korrekturen.

Um die Größe der Eisenverluste selbst zu bestimmen, sind an den gemessenen Werten im allgemeinen eine Reihe von Korrekturen vorzunehmen. Neben den Korrekturen, die die abgelesenen Werte an Hand der Eichkurven der Instrumente erfahren, ist von großer Bedeutung die Berücksichtigung der Stromwärmeverluste, die oft 30 bis 50% und mehr der ganzen gemessenen Leistung betragen. Die Bestimmung des Ohmschen Widerstandes der Statorwicklung genügt, obwohl dies oft allein ausgeführt wird, nicht. Bei Wechselstrom treten durch den Skineneffekt und die in den massiven Kupferleitern induzierten Wirbelströme zusätzliche Verluste auf, deren Größe man ungefähr kennen muß. Auch treten bei zunehmender Sättigung der Zähne andere Streuverhältnisse für die Nuten ein, und die von den Streuflüssen herrührenden zusätzlichen Eisenverluste ändern sich. Alle diese Verluste kann man unter den Begriff Stromwärmeverluste zusammenfassen, wobei ein mit dem Strome wachsender Widerstand  $r$  einzuführen ist. Zur Bestimmung von  $r$  wurde folgender Versuch gemacht:

Bei Stillstand des Rotors wurde nach der Schaltung Fig. 19 Strom in eine Statorphase geschickt und Strom und Leistung gemessen. Die zugeführte Leistung ist hierbei  $W = PJ \cos \varphi$ . Wäre es nun möglich, die in der Phase induzierte EMK  $E$  zu bestimmen und die Leistung  $EJ \cos \psi$  zu messen, so ist die Differenz

$$PJ \cos \varphi - EJ \cos \psi = J^2 r,$$

also gleich den gesamten „Stromwärme“-Verlusten. Nun induziert das Hauptfeld, das in der einen betrachteten Phase  $E$  erzeugt, auch die beiden andern Statorphasen, und  $E$  steht zu den beiden anderen EMKs in einem bestimmten, berechenbaren Verhältnis.

Legt man also statt der Klemmenspannung  $P$  die in einer der beiden anderen Statorphasen induzierte EMK  $E'$  an die Spannungsspule des Wattmeters, so zeigt dies eine Leistung  $E'J \cos \psi$  an, die man nur mit dem bekannten Verhältnis  $E:E'$  zu multiplizieren hat, um die gesuchte Leistung  $EJ \cos \psi$  zu finden. Da es günstig ist, für die beiden Leistungsmessungen nicht allzu weit auseinanderliegende Teile der Wattmeterskala zu benutzen, wurden die beiden anderen Statorphasen gegeneinander geschaltet und die Spannung  $2E'$ , wie die Fig. 19 zeigt, an das Wattmeter geführt.

Zunächst ist das Verhältnis der induzierten EMKs  $E:E'$  zu bestimmen. Der Stator besitzt im vorliegenden Falle 3 Nuten pro Pol und Phase, und bei Erregung der Phase I entsteht ein treppenförmiges Feld, wie es in Fig. 20 stark ausgezogen ist. Wir wollen die Höhe der ersten Stufe mit 1, die der zweiten mit 2 bezeichnen und die Kraftlinienverkettungen berechnen, die Phase I mit dem von ihr erzeugten Felde besitzt. Die Polteilung denken wir uns der Nutenzahl entsprechend in 9 Teile geteilt. Ein Maß für die Verkettungen ist jedesmal die Fläche, die die über der betreffenden Spule errichteten Ordinaten aus der Feldkurve schneiden. Für die mittlere Spule der Phase I ist diese Fläche

$$1 \cdot 1 + 7 \cdot 3 + 1 \cdot 1 = 23.$$

Für die beiden äußeren Spulen je  $7 \cdot 3 = 21$ , insgesamt für Phase I  $= 2 \cdot 21 + 23 = 65$ .

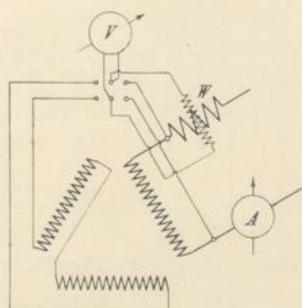


Fig. 19. Schaltung zur Messung des effektiven Widerstandes der Statorwicklung.

Für die linke Spule der Phase II ist punktiert die betreffende Fläche abgegrenzt. Im ganzen haben wir für Phase II

$$5 \cdot 3 + 3 \cdot 3 + 1 \cdot 3 = 27.$$

Das Verhältnis der in den Phasen I und II vom Hauptkraftflusse induzierten EMKe ist also  $65 : 27 = 2,41$ .

Nun weicht der wirkliche Verlauf der Feldkurve von der Treppenform ab. Um ihn zu finden, wurde Phase I mit Gleich-

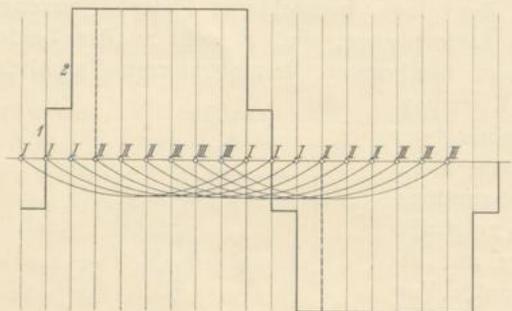


Fig. 20.

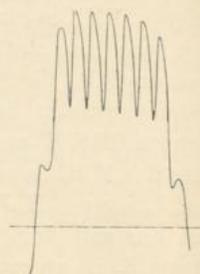


Fig. 21.

strom erregt, und die bei Rotation in diesem Felde in der Prüfspule induzierte EMK oszillographisch aufgenommen. Diese EMK-Kurve ist in Fig. 21 wiedergegeben, sie stellt zugleich die Feld-

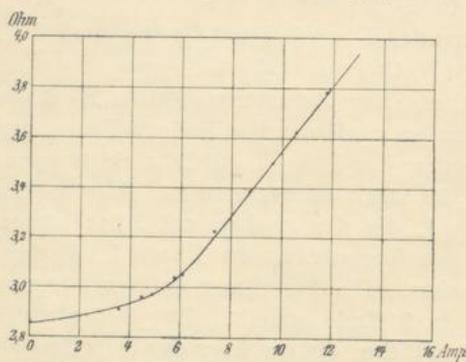


Fig. 22. Abhängigkeit des effektiven Widerstandes von der Stromstärke.

Die nach diesem Verfahren gefundenen Werte des Widerstandes  $r$  sind in Fig. 22 als Funktion des Stromes aufgetragen. Der Gleichstromwiderstand betrug bei  $18^\circ \text{C}$   $0,286 \text{ Ohm}$ . Die Erhöhung von  $r$

kurve dar. An dieser Feldkurve wurde das eben beschriebene Verfahren ebenfalls ausgeführt, und die Flächen planimetriert. Das Ergebnis war die Verhältniszahl  $2,46$ . Es wurden nun Feldkurven bei verschiedenen Sättigungen aufgenommen, doch waren die Resultate untereinander wenig verschieden. Im Mittel war die Verhältniszahl  $2,45$ , also für die Phasen II und III zusammen  $1,225$ .

ist zunächst sehr gering, bei  $J=6$  etwa 5<sup>0</sup>/<sub>0</sub>, und steigt dann geradlinig an. Die Periodenzahl hat auf die Erhöhung von  $r$  keinen meßbaren Einfluß. Da bei den nachfolgenden Untersuchungen der Strom maximal 8 Amp. betrug, war die Erhöhung von  $r$  im allgemeinen gering.

Um den Einfluß der Temperatur auf die Eisenverluste möglichst auszuschalten, wurde jede Versuchsreihe so schnell es ging ausgeführt. Die Temperaturerhöhung der Maschine war im allgemeinen am Ende einer Versuchsreihe 1 bis 2<sup>0</sup> C über der Anfangstemperatur und war bei großen Tourenzahlen gleich 0. Nach jeder Versuchsreihe wurde der Motor durch die Antriebsmaschine so lange auf etwa 1000 Touren gehalten, bis die Anfangstemperatur wieder erreicht war. Die Temperaturerhöhung wurde bestimmt durch ein Thermometer auf dem Statorrücken und aus der Widerstandserhöhung der Statorwicklung und der Prüfspule des Rotors. In den ganzen Wechselfeldversuchen betrug der maximale Temperaturunterschied 5<sup>0</sup> C, bei den Versuchen im elliptischen Feld nur 2<sup>0</sup> C, so daß eine Korrektur nicht vorzunehmen war.

Um ferner Feldverzerrungen zu vermeiden, wurde bei niedrigen Induktionen gearbeitet, maximal im Stator 7500, im Rotor 14200. Der Formfaktor der EMK-Kurve in der Rotorprüfspule sank von der kleinsten bis zur größten Sättigung von 1,11 auf 1,095.

Von Wichtigkeit ist auch eine am ganzen Umfange konstante Größe des Luftspaltes. Um dies zu prüfen, wurde der Stator mit Dreiphasenstrom gespeist, und der Rotor in dem Felde langsam von Hand gedreht. In der Prüfspule muß dann überall die gleiche EMK induziert werden (abgesehen von den örtlichen Schwankungen durch die Zähne und Nuten), und die Lagerschilde wurden so lange verschoben, bis dies erreicht war. Diese Untersuchungsmethode<sup>1)</sup> ist sehr genau. Ist der Luftspalt auf einer Seite z. B. um 10<sup>0</sup>/<sub>0</sub>, also hier um  $\frac{1}{20}$  mm zu groß, so mißt man an dieser Stelle eine etwa 10<sup>0</sup>/<sub>0</sub> kleinere Spannung, im vorliegenden Falle z. B. 1,5 Volt weniger.

## 10. Die Versuchsergebnisse und ihre Auswertung.

Um zunächst einen Überblick über die Güte des Eisens und Vergleichswerte für die späteren Untersuchungen zu bekommen, wurden die Verluste im Kreisdrehfeld in bekannter Weise<sup>2)</sup> gemessen und getrennt. Es wurden zuerst bei verschiedenen Induk-

<sup>1)</sup> Sie rührt von Dr.-Ing. Fraenckel her.

<sup>2)</sup> s. E. Arnold, Wechselstromtechnik, Bd. V, S. 313 bis 323.

tionen und Periodenzahlen die Gesamtverluste der stillstehenden Maschine im Drehfeld (Fig. 23) und im Wechselfeld (Fig. 24) ermittelt. Dann wurden durch Aufnahme des Hysteresissprunges<sup>1)</sup> bei verschiedenen Periodenzahlen und Induktionen die Rotorhysteresis- (Fig. 25) und Wirbelstromverluste (Fig. 26) und die zusätzlichen Verluste an der Rotoroberfläche (Fig. 27) bestimmt. Die Trennung der Verluste gestaltet sich hier besonders leicht, weil durch die benutzte Meßmethode (Federkuppung) die Reibungsverluste von selbst eliminiert werden.

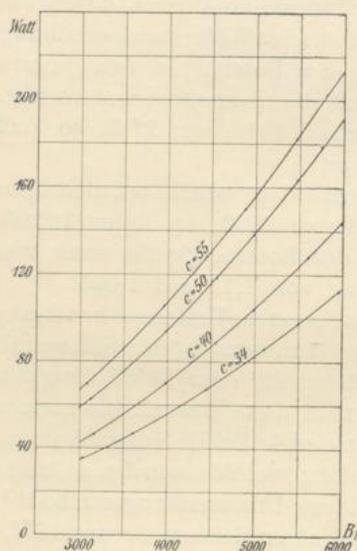


Fig. 23. Gesamtverluste im Kreis-drehfelde bei Stillstand.

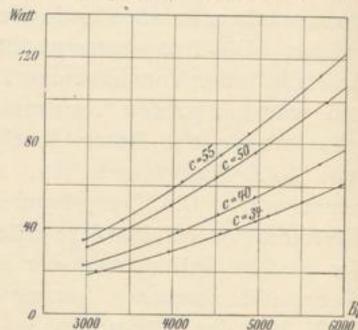


Fig. 24. Gesamtverluste im Wechselfeld bei Stillstand.

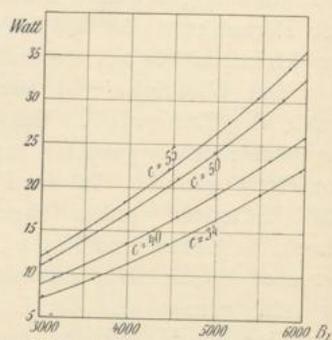


Fig. 25. Rotorhysteresisverluste im Kreis-drehfelde.

Die Messungen im Wechselfelde und im elliptischen Drehfelde wurden so ausgeführt, daß von Stillstand anfangend die Verluste bis etwa 20% Übersynchronismus gemessen wurden. Höhere Tourenzahlen konnten nicht erreicht werden, da die Feder bei etwa 1250 Umdrehungen in Resonanzschwingungen kam, und auch die bei so hoher Geschwindigkeit auftretenden mechanischen Spannungen

<sup>1)</sup> Eine ausführliche Beschreibung des Verfahrens findet sich außer in E. Arnold, Wechselstromtechnik, Bd. V, a. a. O. in ETZ 1908, S. 1704, Bragstad und Fraenckel, Die zusätzlichen Verluste in Induktionsmotoren.

für die Feder gefährlich waren. Eine stärkere Feder konnte aber nicht verwendet werden, da bei den hier vorliegenden kleinen Verlusten ihre Verdrehung zu gering gewesen wäre.

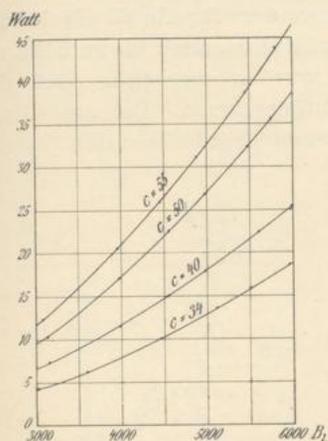


Fig. 26. Rotorwirbelstromverluste im Kreisfeld.

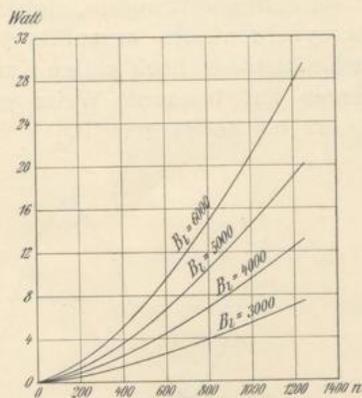


Fig. 27. Zusätzliche Verluste an der Rotoroberfläche.

Fig. 28 zeigt das Schaltungsschema für die Messung der dem Stator elektrisch zugeführten Leistung beim Wechselfeld. Zwei Statorphasen sind in Serie geschaltet, in der dritten liegt ein Voltmeter zur Messung der auf Seite 28 erwähnten EMKe. Die Form der Spannungskurve zeigt das Oszillogramm, Fig. 29, der Formfaktor liegt bei verschiedenen Sättigungen zwischen 1,095 und 1,11. Es wurde hierbei der Dreiphasengenerator verwendet, der auch bei den Drehfeldversuchen benutzt worden war.

Zur Erzeugung des elliptischen Drehfeldes wurde der Stator nach Fig. 30 geschaltet. Als Spannungsquelle dienten zwei genau gleiche Einphasengeneratoren, die auf derselben Welle saßen und deren Feldsysteme  $90^\circ$  gegeneinander versetzt waren. Die Spannungskurve der Generatoren zeigt Fig. 31. Die Kurve ist etwas flacher als die erste Spannungskurve. — Die Versuche wurden bei den Periodenzahlen 34, 40, 50 und 55 angestellt. Im Wechselfeld wurden bei jeder der Periodenzahlen vier verschiedene Induktionen eingestellt. Im elliptischen Felde wurde die Spannung  $V_1$

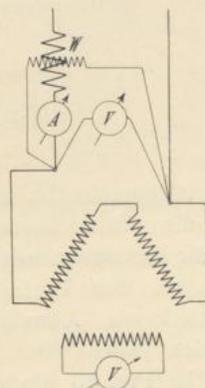


Fig. 28. Schaltungsschema zur Erzeugung eines Wechselfeldes.

(Fig. 30) konstant gelassen und  $V_2$  so geändert, daß das Achsenverhältnis der Ellipsen ungefähr 0,25, 0,5, 0,75, 1 und 1,25 betrug.

Die Meßresultate sind im Anhang I aufgeführt. Nach Beendigung der Versuche stellte es sich besonders für die Wechselfelder als wünschenswert heraus, einige Versuchsreihen auch bis zu höherem Übersynchronismus auszuführen. Es wurden deswegen nach der Auslaufmethode noch einige Kurven aufgenommen. Die aus diesen Kurven auf bekannte Weise gewonnenen Ergebnisse sind in den Fig. 32 bis 35 dargestellt.

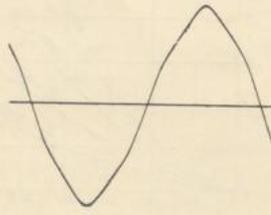


Fig. 29.

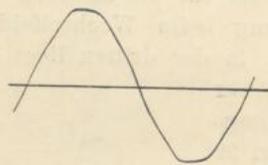


Fig. 31.

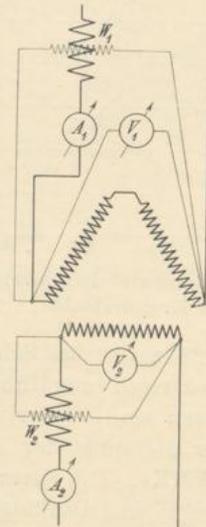


Fig. 30. Schaltungsschema zur Erzeugung eines elliptischen Drehfeldes.

Allgemein ist zunächst zu sagen, daß die gemessenen Werte für die stillstehende Maschine im Drehfeld und Wechselfeld ungefähr das Steinmetzsche Gesetz befolgen. Nur im Drehfeld finden sich bei den Periodenzahlen 50 und 55, besonders bei höheren Induktionen, Abweichungen, die aber im Wechselfeld nicht vorhanden sind.

In Fig. 36 sind für  $c=40$  die Hysterisis- und Wirbelstromverluste im Dreh- und Wechselfeld zum Vergleich miteinander aufgezeichnet. Im Mittel sind die Wirbelstromverluste im Wechselfeld 0,5 von denen im Drehfeld und die Hysterisisverluste 0,56 der Verluste im Drehfeld, so daß eine gute Bestätigung der theoretisch abgeleiteten Werte erreicht ist.

Um die Änderung der Verluste bei stillstehendem Rotor im elliptischen Drehfeld zu erkennen, sind in der folgenden Tabelle

die betreffenden Werte den Versuchsreihen entnommen und zusammengestellt. Zum Vergleich ist es aber notwendig, alle Größen

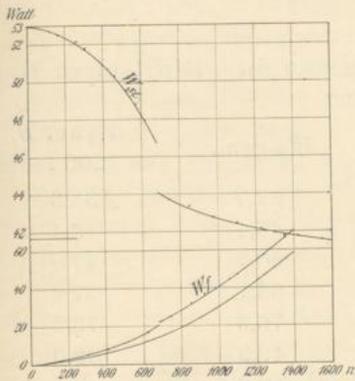


Fig. 32.

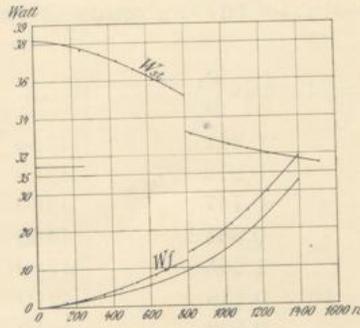


Fig. 33.

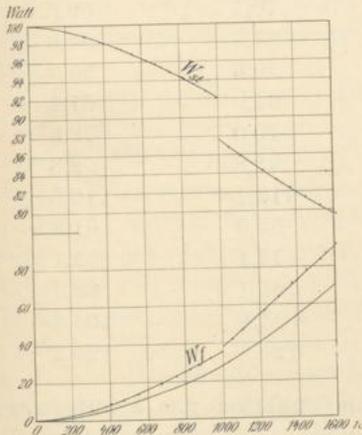


Fig. 34.

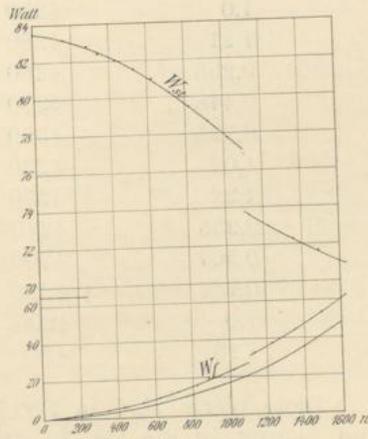


Fig. 35.

Fig. 32—35. Verluste in Wechselfeldern.

$W_{st}$  dem Stator elektrisch zugeführte Leistung.

$W_f$  dem Rotor mechanisch zugeführte Leistung.

Die untersten Kurven jeder Figur sind die aus  $W_{st}$  und  $W_f$  resultierenden Kurven der Gesamtänderung der Verluste bei Drehung des Rotors.

Fig. 32.	Periodenzahl $c = 34$ .	Luftinduktion $B_l = 5500$
" 33.	" $c = 40$ .	" $B_l = 4050$
" 34.	" $c = 50$ .	" $B_l = 5770$
" 35.	" $c = 55$ .	" $B_l = 4850$ .

auf gleiche Induktion in der großen Achse zu reduzieren. Diese Reduktion erfolgte hier auf den Wert  $B_l = 4200$ , von dem die ge-

messenen Induktionen wenig verschieden sind, und zwar mit  $B_1^{1,8}$  als Reduktionsfaktor. Der Fehler, der durch diese Reduktion entsteht, ist unbedeutend.

Verluste für ruhende Eisenmassen in elliptischen Drehfeldern.

$c = 34$	$k = \frac{B_1}{B_2}$	$B_i$	$W_{St}$ gem.	$W_{St}$ auf $B_1$ = 4200 reduz.
	0,242	4350	37,7	35,3
	0,508	4350	43,4	40,4
	0,747	4380	50,7	47,0
	0,984	4430	63,1	57,2
	1,265	4280	76,3	73,5
$c = 40$	0,238	4210	42,2	42,0
	0,508	4210	48,6	48,4
	0,77	4240	58,6	57,6
	1,0	4230	70,5	69,5
	1,21	4280	87,4	84,5
$c = 50$	0,258	4260	56,6	55,3
	0,478	4330	64,9	61,4
	0,725	4330	76,9	72,8
	1,02	4230	93,8	92,8
	1,22	4250	112,1	110,5
$c = 55$	0,253	4240	62,9	61,8
	0,507	4200	71,1	71,1
	0,734	4260	85,1	82,7
	1,0	4200	103,4	103,4
	1,18	4300	125,8	120,2

Diese Werte sind in Fig. 37 als Funktion von  $k$  aufgetragen, und hiermit ist die Fig. 38 gezeichnet, in der für konstante Verhältnisse  $k$  die Verluste als Funktion der Periodenzahl dargestellt sind. Um die Hysterisis- und Wirbelstromverluste zu trennen, ist für jede der letzten Kurven  $W_{St}/c$  als Funktion von  $c$  in Fig. 39 aufgetragen. Die Punkte liegen auf geraden Linien, die auf der Ordinatenachse die Hysterisisverluste für eine Periode bei dem betreffenden  $k$  abschneiden. Die Neigung der geraden Linie ist dagegen ein Maß für die Wirbelstromverluste.

In Fig. 40 sind noch einmal die theoretisch abgeleiteten Kurven für das Verhältnis der Verluste in elliptischen Drehfeldern zu denen in reinen Drehfeldern aufgezeichnet und die an Hand der Fig. 39 ermittelten Punkte in diese Kurven eingetragen. Man erkennt, daß die Übereinstimmung gut ist.

Auffallend ist in Fig. 37, daß die Verluste für  $k=1$  kleiner sind (im Mittel 10%) als die im Dreiphasendrehfeld gemessenen (siehe Fig. 23). Der Grund für diese Erscheinung ist der, daß das von einem Zweiphasensystem erzeugte Drehfeld viel unvollkommener ist als das Drehfeld einer Dreiphasenwicklung. Auch wirkte hier die ungleiche Verteilung der beiden Wicklungen ungünstig mit, so daß die Verluste sich den Verlusten in Wechselfeldern zu nähern scheinen, also kleiner ausfallen. In Übereinstimmung damit steht, daß der Hysteresissprung in den Versuchsreihen für  $k=1$  durchweg kleiner ist, als im dreiphasigen Drehfeld. Diese Beobachtung dürfte deswegen einiges Interesse beanspruchen, als sie lehrt, daß in Zweiphasenmotoren die Trennung der Verluste durch Aufnahme des Hysteresissprunges nicht ganz einwandfrei ist.

In den Fig. 41 bis 44 sind schließlich Beispiele für die Verluste in elliptischen Drehfeldern für die dort näher bezeichneten Verhältnisse gegeben.

Eine Trennung der Verluste im Wechselfeld bei rotierendem Anker ist ebenso wie im elliptischen Drehfelde nicht mehr möglich. Man muß daher, um die genügende Richtigkeit der früher theoretisch abgeleiteten Formeln darzulegen, zu einer indirekten Beweisführung greifen. Sie ist im folgenden so geführt, daß die Verluste, die bei Drehung des Rotors zu den Verlusten im Stillstand hinzukommen (oder ab-

zuziehen sind), gemessen und berechnet sind. In allen Fällen nimmt die dem Stator elektrisch zugeführte Leistung ab. Die dem Rotor zugeführte mechanische Leistung ist teils positiv, teils negativ. Es wurde nun immer die dem Stator elektrisch und die dem Rotor mechanisch zugeführte Leistung als Funktion der Tourenzahl aufgetragen. Die Ordinaten der Kurve der dem Rotor zugeführten Leistung wurden dann je um das Stück, das der Abnahme der Statorverluste bei Lauf gegenüber Stillstand entsprach, verkleinert. Die so entstandene resultierende Kurve stellt die gesamte Änderung der Verluste bei Lauf

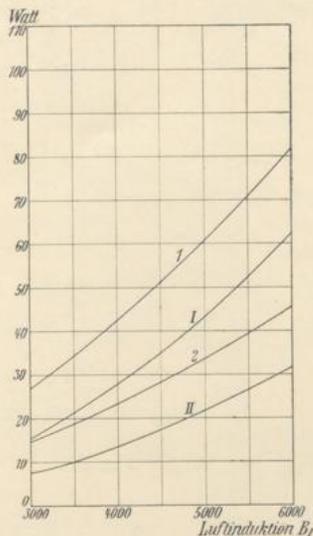


Fig. 36. Vergleich der Hysteresis- und Wirbelstromverluste im Wechselfeld und Drehfeld.

- 1 Gesamte Hysteresisverluste im Drehfelde.
- 2 Gesamte Hysteresisverluste im Wechselfelde.
- I Gesamte Wirbelstromverluste im Drehfelde.
- II Gesamte Wirbelstromverluste im Wechselfelde.

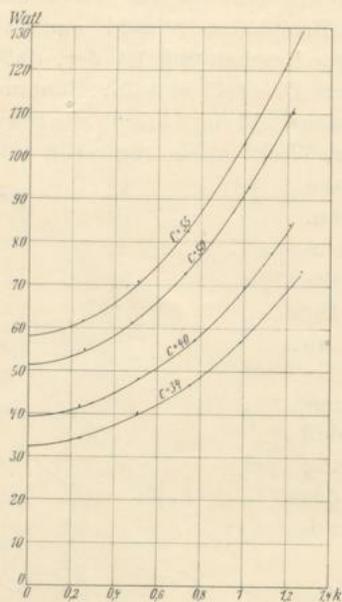


Fig. 37.

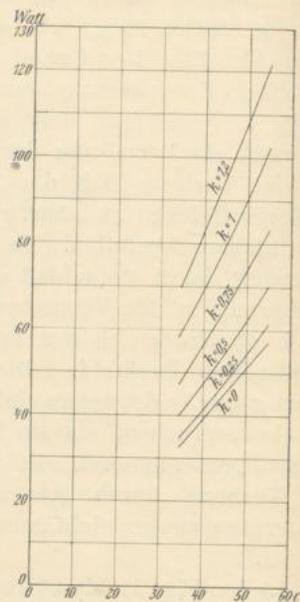


Fig. 38.

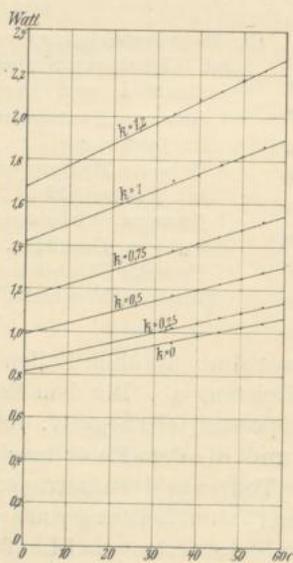


Fig. 39.

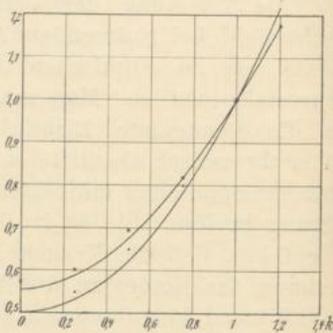


Fig. 40.

Fig. 37—40. Trennung der Verluste in elliptischen Drehfeldern für die ruhende Maschine.

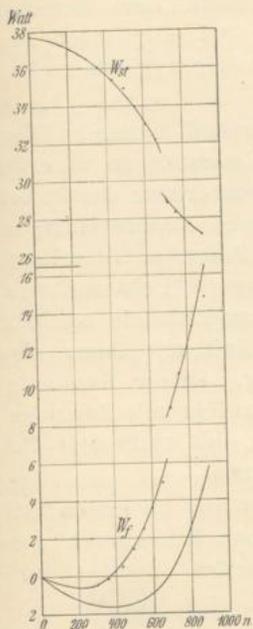


Fig. 41.

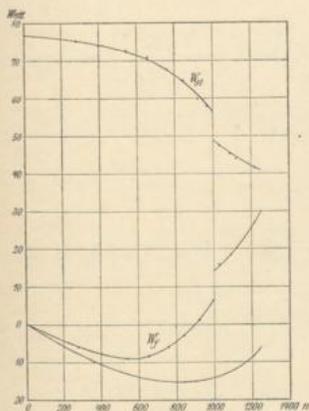


Fig. 43.

Fig. 41—44. Verluste in elliptischen Drehfeldern. Bezeichnungen vgl. Fig. 32—35.

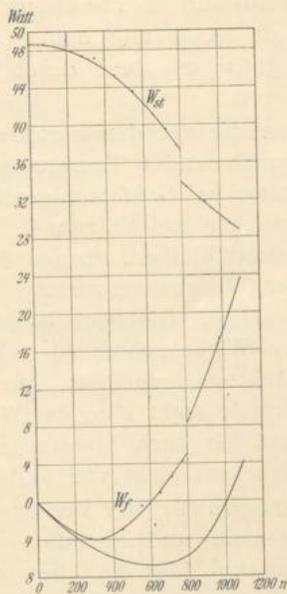


Fig. 42.

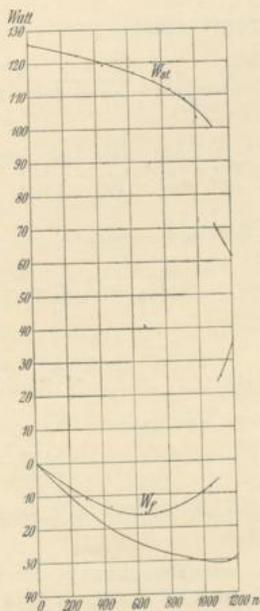


Fig. 44.

Fig. 41.	Periodenzahl $c = 34$ .	Achsenverhältnis $k = 0,242$ .	Luftinduktion in der großen Achse $B_t = 4350$ .
"	" $c = 40$ .	" $k = 0,508$ .	" $B_t = 4210$ .
"	" $c = 50$ .	" $k = 0,725$ .	" $B_t = 4330$ .
"	" $c = 55$ .	" $k = 1,18$ .	" $B_t = 4300$ .

gegenüber Stillstand als Funktion der Tourenzahl dar. Bei Wechsel-  
feldern ist die Änderung immer positiv, bei elliptischen Feldern  
zunächst negativ, um dann durch Null hindurchzugehen und positiv  
zu werden.

Die Abnahme der dem Stator zugeführten Leistung im Wechsel-  
felde mit zunehmender Tourenzahl des Rotors ist so zu erklären,  
daß vom Stator bei Lauf weniger Hysterisisverluste des Rotors ge-  
deckt werden als bei Stillstand. Denn die Statorverluste selbst  
müssen konstant bleiben, ebenso die vom Stator auf den Rotor zur  
Deckung der Wirbelstromverluste übertragene Leistung, wie wir  
auf Seite 16 sahen. Die noch in Betracht zu ziehende mechanische  
Leistung der Wirbelströme (der Motor läuft mit ihnen als ein-  
phasiger Induktionsmotor) ist sehr gering. Dieser Abnahme der  
Hysterisisverluste steht eine der Welle zuzuführende Zunahme ent-  
gegen, so daß wir auch hieraus erkennen, daß insgesamt die Hy-  
sterisisverluste sich nicht viel ändern können.

Zur Berechnung der Verluste wurden die im ersten Teil ent-  
wickelten Formeln und die dort gegebenen Hilfskurven benutzt.  
Die Formeln sind hier zur besseren Übersicht noch einmal zu-  
sammengestellt.

Es ist allgemein:

der Wirbelstromverlust

$$W_w = \frac{1}{2} \sigma_w \left( A \frac{c}{100} \frac{B_1}{1000} \right)^2 \left[ \left( k - \frac{c_r}{c} \right)^2 + \left( 1 - k \frac{c_r}{c} \right)^2 \right] V$$

$$= k_{wr} \sigma_w \left( A \frac{c}{100} \frac{B_1}{1000} \right)^2 V \text{ nach Gl. 10, S. 13,}$$

der Hysterisisverlust

im Stator  $W_h = k_h \sigma_h \frac{c}{100} \left( \frac{B_1}{1000} \right)^{1,6} V$  nach Gl. 14, S. 24,

im Rotor  $W_h = k_{hr} \sigma_h \frac{c}{100} \left( \frac{B_1}{1000} \right)^{1,6} V$  nach Gl. 16 a, S. 25,

die zusätzlichen Verluste

$$\frac{1}{2} (k^2 + 1)$$

von den für ein Kreisdrehfeld bestimmten Verlusten.<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Formeln zur Berechnung der zusätzlichen Verluste im Kreisdreh-  
felde finden sich in ETZ, 1908, S. 1074 von Bragstad und Fraenckel an-  
gegeben und sind wiederholt in E. Arnold, Wechselstromtechnik, Bd. V, Die  
Induktionsmaschinen, S. 208.

Es sind die Faktoren  $k_{wr}$  in Fig. 6, S. 17,  $k_{hr}$  in Fig. 15, S. 25 als Funktion von  $\frac{c_r}{c}$  und  $k_h$  in Fig. 5, S. 16 als Funktion von  $k$  aufgetragen. Bei Lauf des Motors ändern sich für den vorliegenden Fall, da hier keine zusätzlichen Verluste im Stator auftreten, nur die Verluste im Rotor. Um die Änderung der Verluste zu bestimmen, sind also auf Grund der im Kreisdrehfeld im Rotor gemessenen Verluste die jetzt bei Stillstand und bei einer gewünschten Tourenzahl auftretenden Verluste zu berechnen und ihre Differenz zu bilden.

Für das Wechselfeld sind bei Stillstand die Wirbelstromverluste  $\frac{1}{2}$  von denen im Kreisdrehfeld bei Stillstand und bei Lauf

$$\frac{1}{2} \left[ 1 + \left( \frac{c_r}{c} \right)^2 \right].$$

Die Änderung der Verluste ist also

$$\frac{1}{2} \left[ 1 + \left( \frac{c_r}{c} \right)^2 \right] - \frac{1}{2} = \frac{1}{2} \left( \frac{c_r}{c} \right)^2$$

von den bei Stillstand im Kreisdrehfeld gemessenen Verlusten. Für die Hysterisisverluste sind die entsprechenden Faktoren bei Stillstand  $\frac{2}{3,6}$ , bei Lauf bis Synchronismus ebenfalls  $\frac{2}{3,6}$ , bei Übersynchronismus  $\frac{2}{3,6} \frac{c_r}{c}$ , die Differenzfaktoren also von Stillstand bei Synchronismus Null und dann  $\frac{2}{3,6} \left( \frac{c_r}{c} - 1 \right)$ . Die zusätzlichen Verluste sind  $\frac{1}{2}$  von den bei der gleichen Tourenzahl im Kreisdrehfeld auftretenden, und sie werden bei der Berechnung der Verluständerung mit dem so gefundenen Betrage eingesetzt, da ja die zusätzlichen Verluste bei Stillstand Null sind.

Für die elliptischen Felder schreibt man sich für verschiedene Tourenzahlen die bei Drehung des Rotors in diesem auftretenden Verluste in einer Tabelle auf und bildet dann die Differenzen. Für die zusätzlichen Verluste gilt das eben bei den Wechselfeldern Gesagte. Für die elliptischen Felder sind aber hier die den Verlustkurven für das Kreisdrehfeld entnommenen Werte durchweg um 10% kleiner in Rechnung gesetzt entsprechend den kleineren Verlusten im Zweiphasendrehfeld gegenüber denen im Dreiphasendrehfeld (vgl. S. 43).

Für die in den Fig. 32 bis 35 und 41 bis 44 gezeichneten Versuchsreihen sind im folgenden die Rechnungen ausführlich an-

gegeben. Doch sollen hier zum leichteren Verständnis einige Berechnungsbeispiele vollständig durchgeführt werden.

Wir nehmen als erstes Beispiel aus der Tabelle S. 49: Wechselfelder,  $c = 34$ ,  $B_l = 5500$  die Zahlenreihe, die zur Tourenzahl  $n = 1000$  gehört.

Für  $c = 34$  und  $B_l = 5500$  finden wir aus

$$\begin{array}{ll} \text{Fig. 26} & W_w = 15,8, \\ \text{Fig. 25} & W_h = 19,4. \end{array}$$

Der Kurve Fig. 27 entnehmen wir zu  $B_l = 5000$  und  $n = 1000$ ,  $W_{zus} = 14,5$ , also haben wir bei  $B_l = 5500$

$$W_{zus} = 14,5 \left( \frac{5500}{5000} \right)^2 = 17,6.$$

Die Verluständerungen bei  $n = 1000$  gegenüber Stillstand sind daher

$$\text{Wirbelstromverluste} \quad \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{1000}{680} \right)^2 \cdot 15,8 = 17,1$$

$$\text{Hysteresisverluste} \quad \frac{2}{3,6} \left( \frac{1000}{680} - 1 \right) 19,4 = 5,06$$

$$\begin{array}{l} \text{Zusätzliche Verluste} \quad \frac{1}{2} \cdot 17,6 = 8,8 \\ \text{zusammen} \quad 30,96 \text{ Watt.} \end{array}$$

Gemessen wurden, wie der Fig. 32 zu entnehmen ist, 30 Watt. Da die gesamten Verluste bei Stillstand, wie ebenfalls aus Fig. 32 zu ersehen ist, 53 Watt betragen, so sind bei 1000 Umdrehungen 83 Watt gemessen und 83,96 Watt berechnet. Der Fehler beträgt demnach nur 1,1%.

Als Beispiel für die Berechnung im elliptischen Felde nehmen wir auf S. 51 aus der Tabelle  $c = 40$ ,  $B_l = 4210$ ,  $k = 0,508$  die Reihe für  $n = 1000$ .

Wir finden aus den Kurven 25 und 26 wie vorher angegeben

$$W_w = 13 \quad \text{und} \quad W_h = 14,8,$$

also bei der Reduktion um 10%<sup>0</sup>

$$W_w = 11,7 \quad \text{und} \quad W_h = 13,3.$$

Die Verluste bei Stillstand sind, da wir in Fig. 5 für  $k = 0,508$

$$k_w = 0,634$$

und

$$k_h = 0,687$$

finden,

$$\begin{array}{l} W_{w \text{ stillst}} = 11,7 \cdot 0,634 = 7,4, \\ W_{h \text{ stillst}} = 13,3 \cdot 0,687 = 9,1. \end{array}$$

Bei Lauf, für  $\frac{c_r}{c} = \frac{1000}{800} = 1,25$ , finden wir aus Kurve Fig. 6

$$k_{wr} = 0,333$$

und aus Kurve Fig. 15

$$k_{hr} = 0,36,$$

also

$$W_{wlauf} = 11,7 \cdot 0,333 = 3,9,$$

$$W_{hlauf} = 13,3 \cdot 0,36 = 4,8.$$

Die Differenzen gegenüber Stillstand sind daher

$$\text{Wirbelströme} \quad - 3,5,$$

$$\text{Hysterisis} \quad - 4,3.$$

Die zusätzlichen Verluste für  $n = 1000$  und  $B = 4000$  sind nach Fig. 27 9,5. Da  $k_w = 0,634$  ist, ist bei  $n = 1000$

zusätzliche Verluste  $0,9 \cdot 9,5 \left(\frac{4210}{4000}\right)^2 \cdot 0,634 = 6,0$ .

Die gesamte berechnete Änderung der Verluste ist also

$$6,0 - 3,5 - 4,3 = - 1,8 \text{ Watt.}$$

Gemessen wurde nach Fig. 42  $- 0,4$ . Da der gesamte Verlust bei Stillstand 48,6 Watt ist, beträgt der Fehler

$$\frac{- 1,8 - (- 0,4)}{48,6 - 0,4} 100 = - 2,9\%.$$

Auf diese Weise sind die folgenden Tabellen berechnet, wobei alle Einzelwerte angegeben sind.

Vergleich zwischen den gemessenen und berechneten Werten der bei Drehung des Rotors zu den Verlusten bei Stillstand hinzukommenden Verluste.

#### I. Wechselfeld.

Fig. 32  $c = 34$ ,  $B_t = 5500$ .

Verlust bei Stillstand  $W_0 = 53$  Watt.

Tourenzahl	Hinzukommende Wirbelstromverluste	Hinzukommende zusätzl. Verluste	Hinzuk. Hysterisisverluste	Ber. Änderung der Verluste	Gemesene Änderung d. Verluste	Prozentualer Gesamtfehler
$n$	$W_w'$	$W_{zus}'$	$W_h'$	$W_{ber}$	$W_{gem}$	%
200	0,68	0,79	—	1,47	2,0	- 1,0
400	2,73	2,23	—	4,96	5,5	- 0,9
600	6,15	4,09	—	10,24	10,5	- 0,4
800	10,90	6,3	1,9	19,1	19,0	0
1000	17,10	8,8	5,06	30,96	30,0	+ 1,1
1200	24,6	11,55	8,23	44,38	45,0	- 0,6
1400	33,5	14,58	11,4	59,48	59,0	- 0,5

Radt. Eisenverluste.

4

Fig. 33  $c=40$ ,  $B_l=4050$ ,  $W_0=38,2$ .

$n$	$W_w'$	$W_{zus}'$	$W_h'$	$W_{ber}$	$W_{gem}$	%
200	0,38	0,43	—	0,81	1,0	— 0,5
400	1,50	1,21	—	2,71	3,0	— 0,7
600	3,38	2,24	—	5,62	5,5	+ 0,3
800	6,0	3,43	—	9,43	9,0	+ 0,9
1000	9,4	4,8	1,92	16,12	14,0	+ 4,1
1200	13,5	6,32	3,83	23,65	23,0	+ 1,0
1400	18,4	9,71	5,74	33,85	33,0	+ 1,2

Fig. 34  $c=50$ ,  $B_l=5770$ ,  $W_0=100$ .

$n$	$W_w'$	$W_{zus}'$	$W_h'$	$W_{ber}$	$W_{gem}$	%
200	0,70	0,87	—	1,57	1,6	0
400	2,85	2,46	—	5,01	6,0	— 1,0
600	6,5	4,51	—	11,01	12,0	— 1,0
800	11,5	6,94	—	18,44	18,5	— 0,6
1000	17,9	9,7	—	27,6	27,0	+ 0,5
1200	25,7	12,75	3,4	41,85	40,0	+ 1,3
1400	35,0	16,1	6,8	57,9	55,0	+ 1,9
1600	45,6	19,65	10,2	75,45	70,0	+ 3,3

Fig. 35  $c=55$ ,  $B_l=4850$ ,  $W_0=83,5$ .

$n$	$W_w'$	$W_{zus}'$	$W_h'$	$W_{ber}$	$W_{gem}$	%
200	0,5	0,61	—	1,11	1,0	0
400	2,03	1,72	—	3,75	3,0	+ 0,9
600	4,56	3,15	—	7,71	6,6	+ 1,2
800	8,1	4,85	—	12,95	11,4	+ 1,6
1000	12,7	6,78	—	19,48	17,6	+ 1,9
1200	18,3	8,92	1,28	28,50	25,0	+ 3,2
1400	24,8	11,25	3,92	39,97	35,2	+ 4,0
1600	32,6	13,7	6,36	52,66	47,0	+ 4,3

## II. Elliptisches Drehfeld.

Versuchsreihe 17. Fig. 41  $c=34$ ,  $B_l=4350$ ,  $k=0,242$ ,  $W_0=37,7$ .

$n$	$W_w'$	$W_{zus}'$	$W_h$	$W_{ber}$	$W_{gem}$	%
200	— 0,86	+ 0,47	— 0,81	— 1,2	— 1,3	+ 0,2
400	— 0,92	+ 1,33	— 1,62	— 1,21	— 1,7	+ 1,3
600	— 0,26	+ 2,43	— 2,29	— 0,12	— 0,9	+ 2,1
800	+ 1,31	+ 3,75	— 1,52	+ 3,53	+ 2,5	+ 2,6
900	+ 2,33	+ 4,72	— 0,46	+ 6,59	+ 5,8	+ 3,2

Versuchsreihe 23. Fig. 42  $c = 40$ ,  $B_l = 4210$ ,  $k = 0,508$ ,  $W_0 = 48,6$ .

$n$	$W_n'$	$W_{zus}'$	$W_h$	$W_{ber}$	$W_{gem}$	$\%$
200	- 2,5	+ 0,5	- 1,6	- 3,6	- 4,0	+ 0,9
400	- 4,1	+ 1,5	- 3,2	- 5,8	- 6,2	+ 3,8
600	- 4,7	+ 2,7	- 4,8	- 6,8	- 6,4	- 0,9
800	- 4,5	+ 4,2	- 6,4	- 6,7	- 6,5	- 0,5
1000	- 3,5	+ 6,0	- 4,3	- 1,8	- 0,4	- 2,9

Versuchsreihe 29. Fig. 43  $c = 50$ ,  $B_l = 4330$ ,  $k = 0,725$ ,  $W_0 = 76,9$ .

$n$	$W_n'$	$W_{zus}'$	$W_h$	$W_{ber}$	$W_{gem}$	$\%$
200	- 5,0	+ 0,7	- 2,4	- 6,7	- 6,0	- 1,0
400	- 8,8	+ 1,9	- 5,1	- 12,0	- 11,0	- 1,5
600	- 11,4	+ 3,5	- 7,6	- 15,5	- 14,0	- 2,4
800	- 12,9	+ 5,3	- 10,0	- 17,6	- 15,5	- 3,5
1000	- 13,2	+ 7,45	- 12,4	- 18,1	- 14,3	- 6,2
1200	- 12,5	+ 9,8	- 9,6	- 12,3	- 9,5	- 4,1

Versuchsreihe 36. Fig. 44  $c = 55$ ,  $B_l = 4300$ ,  $k = 1,18$ ,  $W_0 = 125,8$ .

$n$	$W_n'$	$W_{zus}'$	$W_h'$	$W_{ber}$	$W_{gem}$	$\%$
200	- 7,6	+ 1,1	- 3,7	- 10,2	- 10,0	- 0
400	- 14,7	+ 2,9	- 7,4	- 19,2	- 18,6	- 1,3
600	- 20,0	+ 5,4	- 10,9	- 25,5	- 24,5	- 1,0
800	- 23,5	+ 8,2	- 14,0	- 29,9	- 28,0	- 2,0
1000	- 25,0	+ 11,4	- 18,7	- 32,3	- 30,5	- 1,9
1200	- 24,6	+ 15,1	- 18,7	- 28,2	- 28,5	+ 0,3

Die Übereinstimmung ist also durchweg befriedigend. Im Anhang II ist nun für das gesamte Versuchsmaterial diese Vergleichsrechnung gemacht, doch sind dort nicht mehr die einzelnen Summanden der errechneten Verluste mit angegeben.

## 11. Kritik der Versuchsergebnisse.

Im allgemeinen sind die Abweichungen zwischen gemessenen und berechneten Werten so gering, daß für den berechnenden Ingenieur die Formeln genügen dürften, zumal die Berechnungsweise — an Hand von Kurven sind die in gewöhnlicher Weise für ein Drehfeld bestimmten Verluste für den jedesmal vorliegenden Fall zu reduzieren — sehr einfach ist. Daß im einzelnen Abweichungen vorkommen, bisweilen sogar der Charakter der errechneten und der gemessenen Kurven verschieden ist, war von vornherein zu erwarten. Denn ganz abgesehen von Beobachtungsfehlern und der

Ungenauigkeit der benutzten technischen Messinstrumente ist die Theorie auf den einfachen Voraussetzungen eines sinusförmigen und vollkommenen Kreisdrehfeldes aufgebaut, das praktisch nicht vorhanden ist. Auch scheint es, als ob der vernachlässigte Unterschied zwischen drehender und wechselnder Ummagnetisierung teilweise doch, wenn auch nicht sehr stark, sich bemerkbar macht. Für die Verluste in der stehenden Maschine, praktisch also für den Stator, scheint allerdings der Beweis für die Richtigkeit der theoretischen Werte erbracht zu sein. Im sich drehenden Rotor herrschen dagegen so komplizierte Ummagnetisierungsvorgänge, daß für die nächste Zeit kaum Aussicht auf Klärung der Verhältnisse vorhanden zu sein scheint. Zu beachten ist ferner, daß bei der vorliegenden Untersuchung mit sehr geringen Energiemengen zu arbeiten war, so daß schon ein Fehler von wenigen Watt das Bild trüben kann. Trotzdem erscheint nach den Ergebnissen die Annahme gerechtfertigt, daß an Hand der gegebenen Formeln sich die Eisenverluste mit genügender Genauigkeit berechnen lassen.

## Anhang I.

### a) Versuchsergebnisse für das Wechselfeld.

Periodenzahl  $c = 34$ .

#### 1. Luftinduktion $B_i = 3230$ (Amplitude).

Um- drehungs- zahl $n$	Elektr. zu- gef. Leistung $W_{st}$	Mechan. zu- gef. Leistung $W_f$ (ohne Reibungs- verluste)	Um- drehungs- zahl $n$	Elektr. zu- gef. Leistung $W_{st}$	Mechan. zu- gef. Leistung $W_f$ (ohne Reibungs- verluste)
0	20,6	0	592	19,4	4,9
236	20,4	1,1	654	19,1	5,0
343	20,0	1,8	699	18,0	7,7
443	19,8	3,1	746	17,8	8,0
491	19,6	3,7	790	17,6	8,4
546	19,5	4,4	880	17,4	9,5

#### 2. $B_i = 3960$ .

$n$	$W_{st}$	$W_f$	$n$	$W_{st}$	$W_f$
0	29,0	0	596	26,9	7,2
233	28,6	1,3	658	26,3	8,4
343	28,4	2,9	693	24,4	10,5
446	28,0	4,9	746	24,2	12,0
492	27,6	5,4	790	24,0	13,2
542	27,3	6,1	880	23,8	15,5