

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band: 14 (1923)
Heft: 10

Artikel: Zusätzliche Verluste in Synchronmaschinen und ihre Messung
[Fortsetzung und Schluss]
Autor: Rüdenberg, Reinhold
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1060395>

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: 16.05.2025

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

De puissantes usines fonctionnent en Allemagne à des conditions très avantageuses; la France va monter à Toulouse une installation pour 75 000 tonnes par an d'ammoniaque, procédé Haber-Bosch.

Les centres de production de cyanamide, créés pendant la guerre pour la fabrication de l'acide nitrique, peuvent lancer sur le marché près de 900 000 tonnes de cet engrais (Suisse environ 50 000 tonnes).

D'autre part, le sulfate d'ammoniaque à 20 % d'azote est un *sous-produit* des cokeries des hauts fourneaux et des usines à gaz; les fabricants de sulfate d'ammoniaque ont dû assujétir leurs prix à celui des cokeries, car il ne peut être fait de différence entre le produit obtenu par les eaux ammoniacales ou par l'ammoniaque synthétique. Cet engrais est très apprécié et son action fertilisante est des plus complètes. Fabriquer du sulfate d'ammoniaque dans notre pays exigerait d'énormes quantités d'acide sulfurique importé, car nous n'avons aucun intérêt à traiter les pyrites que nous devrions également faire venir de l'étranger.

On pensait avoir raison du salpêtre du Chili (nitrate de soude à 15,5 %) en écartant cette source lointaine d'azote au moyen d'usines de synthèse. Il n'en a rien été. L'agriculteur connaît cet engrais depuis longue date: il n'en avait pas d'autre; et comme les frêts maritimes sont redescendus très rapidement depuis deux ans, notre importation arrive de nouveau au chiffre d'avant guerre. Tout fait prévoir qu'elle ne cessera d'augmenter. La concurrence faite au nitrate naturel par l'industrie de l'azote atmosphérique aura pour conséquence certaine une baisse de prix de la part des exportateurs chiliens; ce que l'industrie n'absorbera plus pour la fabrication de l'acide nitrique sera offert avantageusement à l'agriculture qui ne se fera pas faute de profiter de l'aubaine.

L'industrie de l'azote par l'énergie électrique peut présenter chez nous un certain nombre d'avantages qui engagent à étudier la question dans tous ses détails, mais il faut que, soustraction faite des risques et des difficultés économiques qui sont les nôtres, il reste sous la barre un minimum de sécurité, disons de chances qui motive la création de semblables entreprises et permette à nos centrales de vendre leur courant à des conditions acceptables, ceci d'autant plus que les nouvelles installations hydro-électriques sont plus coûteuses.

Zusätzliche Verluste in Synchronmaschinen und ihre Messung.

Von Reinhold Rüdenberg, Charlottenburg.

(Fortsetzung und Schluss.)

Nachdem der Autor im ersten Teil dieser Arbeit¹⁾ die in Synchronmaschinen auftretenden Streufelder untersucht und Formeln zu deren Berechnung angegeben hat, gibt er im vorliegenden Teil die Ergebnisse zahlreicher Versuche an aus Maschinen, durch welche der Sitz der Zusatzverluste festgestellt und in Uebereinstimmung mit den Berechnungen gefunden wird. Gleichzeitig weist er nach, dass die Zusatzverluste mit grosser Genauigkeit durch einen Kurzschlussversuch an der fertigen Maschine festgestellt werden können.

¹⁾ Siehe Bulletin 1923, No. 9, Seite 514 und ff.

Après avoir indiqué, dans la première partie de son article¹⁾, comment il est possible de déterminer les pertes dues aux flux de dispersion l'auteur rend maintenant compte du résultat de nombreuses expériences exécutées sur différentes machines dans le but de déterminer le siège des différentes pertes.

Il démontre la concordance entre ses formules et les expériences et la possibilité de déterminer les pertes expérimentalement avec une grande précision au moyen d'un essai en court-circuit.

¹⁾ Voir Bulletin 1923, No. 9, page 514 et suivantes.

2. Messung der Zusatzverluste.

Man kann die Zusatzverluste von Synchronmaschinen durch relativ einfache Messungen weitgehend *in ihre verschiedenen Bestandteile zerlegen*. Zur Kontrolle der Richtigkeit der Ständerwicklung und auch zur Kontrolle der Streuspannung der Maschine, deren Wert für die Grösse des Stosskurzschlussstromes ausschlaggebende Bedeutung hat, pflegt man im Prüffelde häufig eine „*Streuprobe*“ bei herausgenommenem Läufer nach Fig. 15 vorzunehmen, indem man die Ständerwicklung mit

dem normalen Drehstrom beschickt und dabei Spannung und Leistungsaufnahme misst. Es bilden sich hierbei lediglich Streufelder in den Nuten, um die Wicklungsköpfe und in der Bohrung des Ständers aus, so dass man nur die anfangs besprochene Art der *Zusatzverluste in den Nutenleitern und den Stirnverbindern und deren Umgebung* erhält, die am Wattmeter in der Grösse V_w abgelesen werden können. Den entsprechenden Wicklungswiderstand nennt man den *Wechselstromwiderstand* der Maschine. Das *Bohrungsfeld* selbst, das bei dieser Messung auftritt, erzeugt keine merkbaren Eisenverluste. Seine Grösse ist im Verhältnis zum normalen Felde der Maschine

$$\frac{\Phi_b}{\Phi_n} = \frac{6 \sqrt{2}}{5} \frac{A_1}{B}, \quad (15)$$

wobei B die Sinusamplitude des Hauptfeldes der Maschine ist. Bei grösseren Maschinen beträgt dies ungefähr

$$\frac{\Phi_b}{\Phi_n} = 1,7 \frac{400}{6800} = 10\% .$$

Da die Eisenverluste proportional dem Quadrat der Stärke des Feldes sind, so bewirkt das *Bohrungsfeld* daher nur etwa 1% der regulären Eisenverluste, was innerhalb der Messgenauigkeit liegt.

Zur Feststellung der gesamten Zusatzverluste kann man eine „*Kurzschlussprobe*“ anstellen, indem man die fertige Maschine im Prüffeld mit kurzgeschlossener Ständerwicklung laufen lässt und sie soweit erregt, dass im Ständer der normale Strom fliesst. Dann bilden sich nach dem früher Gesagten nicht nur die Nuten- und

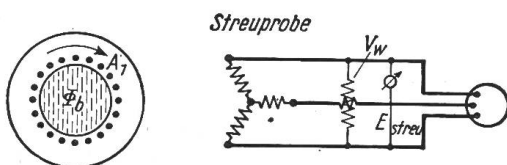


Fig. 15

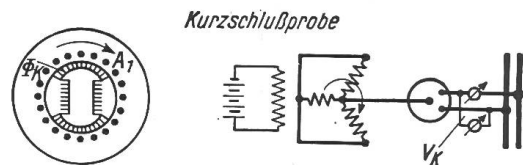


Fig. 16

Stirnstreufelder, sondern *auch sämtliche Luftspaltstreufelder* aus. Durch Messung der mechanisch zugeführten Leistung V_k , z. B. durch einen geeichten Antriebsmotor nach Fig. 16, kann man nach Abzug der Reibungsarbeit die *Kurzschlussverluste* feststellen. Im Kurzschluss bleibt nur ein Rest des Hauptfeldes bestehen, das den Strom unter Ueberwindung der Ständerstreu Spannung durch die Wicklung treibt. Dieses Kurzschlussfeld verhält sich zum normalen Hauptfeld wie die Ständerstreu Spannung zur Normalspannung, und die Ständerstreu Spannung erhält man aus der bei der Streuprobe gemessenen totalen Spannung E_{streu} durch Abzug der Bohrungsfeldspannung. Das *Kurzschlussfeld* ist daher im Verhältnis zum normalen Feld

$$\frac{\Phi_k}{\Phi_n} = \frac{E_{streu}}{E} - \frac{\Phi_b}{\Phi} . \quad (16)$$

Für eine grössere Maschine ist es etwa

$$\frac{\Phi_k}{\Phi_n} = 20\% - 10\% = 10\% .$$

Seine regulären Eisenverluste spielen daher ebenfalls keine Rolle.

Durch Vergleich der Kurzschlussprobe mit der Streuprobe erhält man daher diejenigen Zusatzverluste getrennt, die sich einerseits in der Umgebung der Ständerwicklung und andererseits in der Umgebung des Luftspaltes ausbilden.

Eine weitere Aufteilung der Wechselstromverluste in *Stirnverluste und Nutenverluste* kann man manchmal erzielen, wenn es möglich ist, die Wicklungszweige des Ständers für den Versuch so gegeneinander zu schalten, dass sich zwar alle Nutenfelder, jedoch kein Stirnfeld ausbilden kann. Dazu muss in aufeinanderfolgenden

Nuten stets entgegengesetzte Stromrichtung herrschen, was sich bei manchen Wicklungsarten durch Gegeneinanderschalten einzelner Zweige versuchsweise durchführen lässt. Fig. 17 zeigt ein Beispiel einer solchen Wicklung, die normalerweise für Doppeltsternschaltung bestimmt war. Schaltet man die beiden Stromzweige jeder Phasenwicklung richtig hintereinander, so ergibt sich die reguläre Stromverteilung, wie man aus den oberen Pfeilen erkennt. Nimmt man jedoch eine Gegenschaltung vor, indem man die Zweige verkehrt hintereinander schaltet, so heben sich, wie man aus den unteren Pfeilen erkennt, die magnetischen Wirkungen je zweier benachbarter Nuten auf. Die Wickelköpfe erzeugen daher kaum noch ein Feld, während der Nutenfluss sich um jede einzelne Nut schliesst und innerhalb der Nut fast unverändert bleibt. Man erhält dadurch gleichzeitig eine Aufteilung der Streuspannung der Maschine nach Nutenstreuung und Gesamtstreuung. In Tabelle I sind derartige Messungen an einem Turbogenerator von 4000 kVA

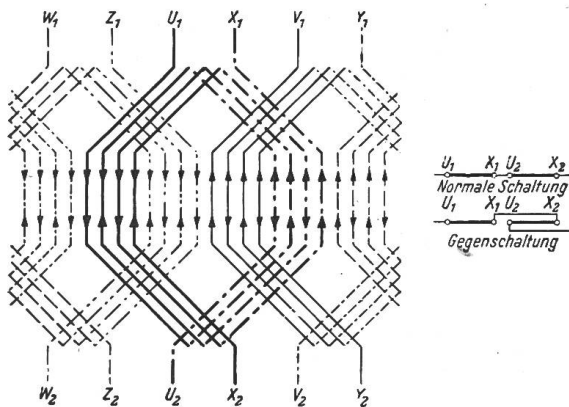


Fig. 17

bei 3000 U/min. zusammengestellt. Es zeigt sich, dass bei richtig unterteilten Leitern die Wechselstromverluste durch Nutenstromverdrängung gegenüber den Gleichstromverlusten nur wenig vermehrt werden, dass dagegen die Stirnverluste ein erhebliches Vielfaches der Gleichstromverluste ausmachen. Derartige Verhältnisse liegen bei fast allen Turbogeneratoren vor. Man wird noch viel Forschungsarbeit und praktische Arbeit darauf verwenden müssen, um diese Stirnverluste herabzudrücken.

Bestimmungen der Wechselstromverluste in den Stirnverbindungen und in den Nuten.

Tabelle I

	Normal-	Gegen-
	Schaltung	
Streuspannung gerechnet . . . %	17,7	2,9
Streuspannung gemessen . . . %	17,2	3,3
Gleichstromverluste . . . kW	12,6	12,6
Wechselstromverluste . . . kW	52,6	16,4
Verlustvermehrung . . . fach	4,2	1,3
Stirnverluste kW	36,2	—

Bestimmung der Wechselstromverluste in der Versteifungskonstruktion eines Turbogenerators.

Tabelle II

	kW	fach
Gleichstromverluste	18	—
Wechselstromverluste	106	5,9
desgl. ohne Versteifung	48	2,5
Versteifungsverluste	58	3,2

Wie schädlich ungünstige Versteifungskonstruktionen wirken können, zeigt ein Versuch an einem Turbogenerator von 6000 kVA bei 3000 U/min., bei dem die sehr reichlichen metallischen Ringe und Laschen zu einer Vergleichsmessung abgenommen wurden. Aus Tabelle II ergibt sich, dass allein in den Versteifungen ein mehr als dreimal so grosser Verlust entstand, wie ihn Gleichstrom von normaler Stärke in der gesamten Wicklung hervorruft. Es ist daher wesentlich, an Stelle der früher oft benutzten gewaltigen Metallversteifungen ähnlich Fig. 18, die womöglich noch aus Eisen bestanden, die Konstruktion so auszuführen, dass man möglichst ohne Metall, allein mit Holz oder ähnlichen Isoliermitteln, die auf Druck beansprucht werden, auskommen kann. Fig. 19 zeigt eine gute derartige Konstruktion, bei der die Metallteile aus dem Streufeld nach Möglichkeit verbannt sind.

Es ist öfter vorgeschlagen worden, zum Abdämpfen der Stirnstreufelder von den Eisenteilen diese mit einem Kupferbelag zu umgeben. Eine Durchrechnung der Verhältnisse ergibt, dass dieser viele Zentimeter Dicke erhalten müsste, um das Feld richtig abzuschirmen. Im Kupferbelag selbst würden dann aber Verluste entstehen, die grösser sein können als diejenigen, die man vermeiden will.

Während der Gleichstromwiderstand der Wicklungen stark *von der Temperatur abhängt*, ist diese Abhängigkeit bei den Eisenverlusten, sowie bei den gesamten Wechselstrom- und Kurzschlussverlusten nur geringfügig. Fig. 20 zeigt Ergebnisse von Messungen an einem Turbogenerator von 7500 kVA bei 3000 U/min., bei dem

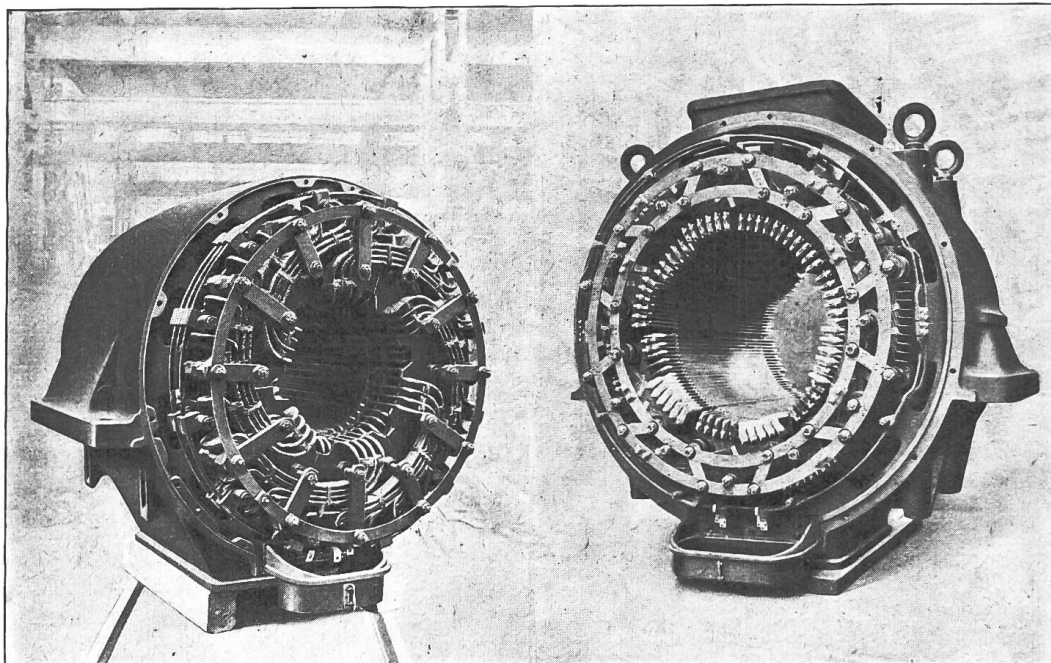


Fig. 19

Fig. 18

vollständige Konstanz der Verluste zwischen 0 und 100° C vorhanden ist. Dies rührt davon her, dass die regulären Kupferverluste zwar mit zunehmender Temperatur wachsen, die Wirbelstromverluste dagegen wegen des vermehrten Widerstandes ihrer Strombahnen abnehmen. In manchen Maschinen kompensiert sich dies vollständig, in anderen bleibt ein kleiner Rest übrig, der jedoch im Verhältnis zu anderen Fehlerquellen so geringfügig ist, dass man ihn vernachlässigen darf.

Sowohl die Wechselstromverluste als auch die gesamten Kurzschlussverluste *wachsen natürlich quadratisch mit der Stromstärke an⁴⁾*, weil alle Wirbelstromverluste im quadratischen Verhältnis zum erzeugenden Felde stehen, das seinerseits proportional dem Strome wächst. Fig. 21 stellt die Zusatzverluste eines Turbogenerators von 2500 kVA bei 3000 U/min. in Funktion vom Ständerstrom dar. Durch Aufzeichnen der Wirkspannung der Verluste, die linear mit dem Strome wächst, wird das quadratische Gesetz gut bestätigt.

Sehr stark ist die *Abhängigkeit der Verluste von der Grösse des Luftspaltes der Maschine*. Bei den Kurzschlussverlusten ist dies nach den früheren Formeln ohne weiteres verständlich, da sich mit abnehmendem Luftspalt durchweg stark zunehmende

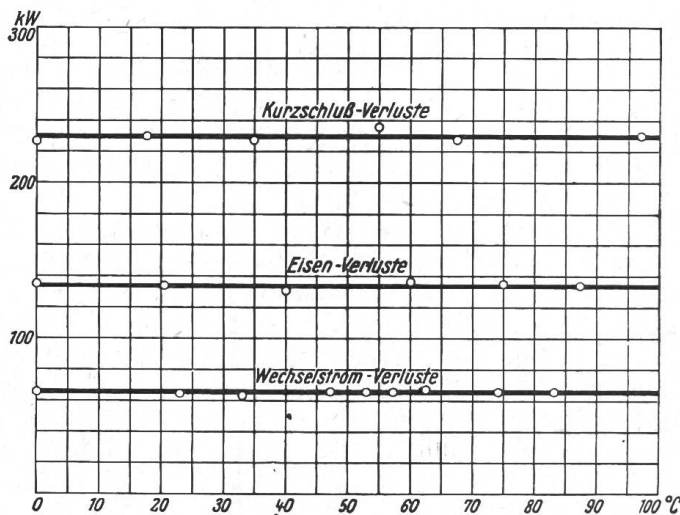


Fig. 20

⁴⁾ W. J. Forster und E. Knowlton, Proc. Am. Inst. El. Eng. 1913, Bd. 32, S. 147.

parasitäre Zahn- und Oberfelder ergeben. Aber auch die Eisenverluste nehmen mit grösser werdendem Luftspalt erheblich ab. Dies rührt von den Zahn- und Oberfeldern des Läufers her, die mit wachsendem Luftspalt stärker als das Hauptfeld abnehmen, da sie sich bei grossem Luftspalt quer durch ihn hindurch ausgleichen können. Fig. 22 stellt die Eisen- und Kurzschlussverluste eines Turbogenerators von 2500 kVA bei 3000 U/min. dar, dessen Läufer schrittweise abgedreht wurde. Sie sinken rapid mit zunehmender Luftspaltweite. Da die Kurzschluss- und Eisenverluste einen grossen Teil der Gesamtverluste ausmachen, so erkennt man, dass die richtige Wahl des Luftspaltes einer der wichtigsten Punkte der Maschinendimensionierung ist. Man kann manchmal feststellen, dass durch Vergrössern des Luftspaltes nicht nur die Erwärmung der Ständer-, sondern auch die der Läuferwicklung abnimmt, obgleich diese doch bei grossem Luftspalt wesentlich mehr Erregerstrom führen muss. Ein grosser Luftspalt hat neben den geringeren Zusatzverlusten noch den Vorteil, mehr Kühlluft zu führen, was seine günstigen Wirkungen noch weiter unterstützt.

Es ist wichtig, zu erfahren, auf welchen Grenzwert man die Verluste durch weitere Vergrösserung des Luftspaltes herunterbringen kann. Zu dem Zwecke sind in Fig. 23 die Verluste als Funktion des reziproken Luftspaltes aufgetragen, damit auch der Luftspalt Unendlich durch den Ursprung mit aufs Bild kommt. In diesem Punkte ist die Grösse der bei der Streuprobe gemessenen Wechselstromverluste und der auf Grund der Verlustziffer des Eisens

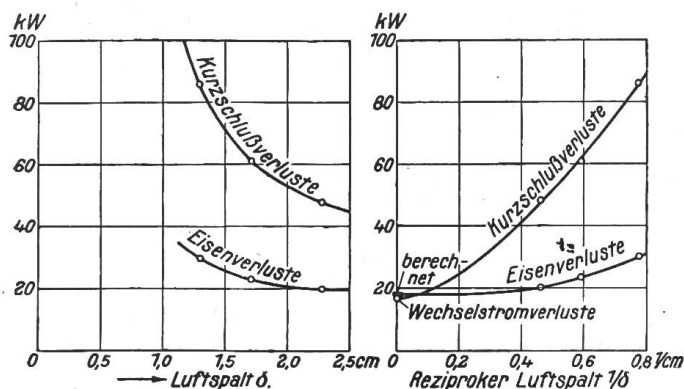


Fig. 22

Fig. 23

Verschachtelung der verschiedenen Phasenleiter wirkungsfeld möglichst oberwellenfrei wird.

Die Kurve der Eisenverluste mündet in den vorausberechneten Punkt. Der Ueberschuss der wirklichen Eisenverluste über die gebräuchliche Rechnung, der bei praktischen Maschinen bekanntlich zwischen 20 und 100 % liegt, ist hierdurch im wesentlichen auf die Wirkung der Zahn- und Oberfelder im Luftspalt zurückgeführt und lässt sich durch deren Verringerung wesentlich verbessern.

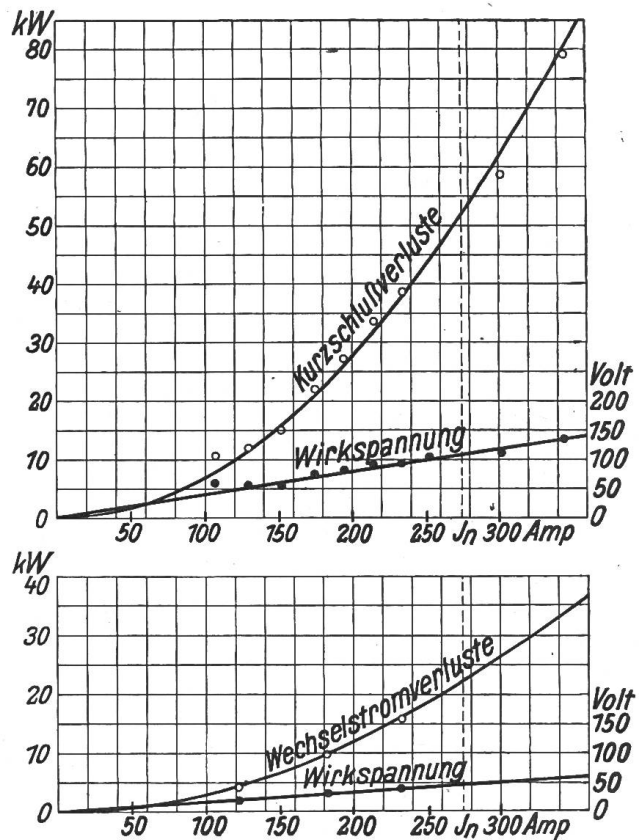


Fig. 21

für sinusförmiges Feld berechneten Eisenverluste eingetragen. Man erkennt nun, dass die Kurzschlussverluste zwanglos in die Wechselstromverluste übergehen, wenn man den Luftspalt mehr und mehr vergrössert. Dies rührt von dem schliesslich vollständigen Fortfall der Zahn- und Oberfeldverluste her und zeigt deutlich, in welcher Richtung noch Fortschritte zu erwarten sind. Man muss durch zweckmässige Verteilung der einzelnen Stromleiter über den Umfang und unter Umständen durch dafür sorgen, dass das Ankerrück-

Tabelle III

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Normal- werte	für jede Maschine			Verluste in den Maschinen							Diffe- renz (10)-(11) %	Zu- satz- ver- luste (11)-(9) %	Bauart und Messung
	<i>E</i>	<i>I</i>		Reibung	Eisen	$I^2 R_{40^\circ}$	Kurz- schluss	ΣV $R+E+I^2 R$	ΣV $R+E+K$	direkt gem.			
	Volt	Amp.	$\cos \varphi$	kW	kW	kW	kW	kW	kW	kW			
12 000 kVA 5 000 Volt Δ 1380 A 300 U/min 50 Per/sec	5005 5000 5500 5000 5380	1155 1380 1155 1500 1320	0,99 0,78 0,69 0,67 0,98	330 330 330 330 330	310 316 374 312 356	64 91 64 107 83	261 372 259 432 340	704 731 768 749 769	901 1012 963 1074 1026	910 1007 946 1066 1039	- 1,0 + 0,5 + 1,7 + 0,6 - 1,3	29,2 38,2 23 42,5 35	Schenkel- polläufer Kreis- schaltung
10 000 kVA 5000 Volt 1160 A 1500 U/min 50 Per/sec	3930 5010	1180 1170	0,98 0,56	339 339	115 191	48 57	270 266	502 577	724 796	781 783	- 7,2 + 1,7	55,0 36,8	Zylinder- läufer Kreis- schaltung
4500 kVA 5250 Volt Δ 495 A 3000 U/min 50 Per/sec	5432 5304 5232 5200 5232 5216	373 392 333 294 247 186	0 0 0 0 0 0	88,5 88,5 88,5 88,5 88,5 88,5	57,5 54,5 51,9 50,8 50,2 49,5	7,2 7,8 5,7 4,5 3,2 1,8	29,3 32,1 24,2 19,9 15,3 10,3	153,2 150,8 146,1 143,8 141,9 139,8	174,8 175,1 164,6 159,2 154,0 148,3	183,5 180,6 165,4 156,3 147,5 144,1	- 4,6 - 3,0 - 0,5 + 1,8 + 4,4 + 2,5	19,2 20,0 12,6 8,0 4,2 2,8	Zylinder- läufer Ueber- erregter Synchro- motor
3140 kVA 530 Volt Δ 3430 A 3000 U/min 50 Per/sec	208 360 450 450 450 520 520 520 520 545 543 543	950 1750 2470 2470 2610 3140 3350 3370 3500 3350 3500 3780	1,0 0,58 0,62 0,78 1,0 0,59 0,79 1,0 0 0,80 1,0 0 0,75 0,87	89 89 89 89 89 89 89 89 89 89 89 89	11 30 45 45 45 63 63 63 63 73 72 72	2,3 8 16 16 18 26 29 29 32 27 33 29 32 37	20 43 77 77 85 124 140 142 155 132 161 140 155 184	102,3 127 150 150 152 178 181 181 184 179 185 191 194 199	120 162 211 211 219 276 292 294 307 284 313 302 316 345	117 163 212 219 245 282 322 336 296 313 366 307 341 382	+ 2,5 - 0,6 - 0,5 - 3,6 - 10,4 - 2,0 - 9,2 - 12,4 + 3,6 - 9,3 - 14,5 - 1,5 - 7,2 - 9,6	14,6 28,2 41,0 46,0 61,0 58,8 78,0 85,8 61,0 74,2 98,0 60,5 75,6 91,5	Zylinder- läufer Δ Schaltung Kreis- schaltung
3530 kVA 3500 Volt Δ 582 A 1500 U/min 25 Per/sec	3445 2875 2290 3280	578 432 304 302	0,86 0,81 0,82 0,70	143 143 143 143	93 60 36 82	29 16 8 8	80 40 20 20	265 219 187 233	316 242 199 245	318 242 181 244	- 0,5 0 + 10,0 + 0,3	20,0 10,5 - 1,7 5,0	Zylinder- läufer Kreis- schaltung
4500 kVA 3350 Volt $\circ$ 1340 A 1000 U/min 16 $\frac{2}{3}$ Per/sec	3300 2750 2670 2650 2200	870 880 622 1070 846	0,88 0,42 0,94 0,97 1,0	111 111 111 111 111	143 99 91 91 62	21 22 11 32 20	155 157 83 225 145	275 231 213 234 193	409 367 286 427 318	387 338 290 420 311	+ 5,5 + 8,5 - 1,3 + 1,6 + 2,2	40,8 46,2 35,5 80,0 65,0	Zylinder- läufer Einphasig Kreis- schaltung

Es erscheint nach alledem gerechtfertigt, die Zusatzverluste bei Belastung von Synchronmaschinen, die durch die oben analysierten Streufelder hervorgerufen werden, durch eine einfache Messung der Verluste beim Kurzschlusslauf an der fertigen Maschine zu bestimmen, ohne dass es nötig wäre, die Maschine zu belasten. *Man kann hiernach die Zusatzverluste der Synchronmaschine durch eine ebenso einfache Messung feststellen wie ihre Eisenverluste.* Ob man die Kurzschlussverluste der Maschine durch Antrieb von einem geeichten Hilfsmotor oder durch Auslauf ihrer geeichten Schwungmassen misst, ist natürlich gleichgültig.

Um diese Messmethode experimentell zu prüfen, wurden im Laufe der letzten Jahre bei den Siemens-Schuckertwerken einige Reihen von *Vergleichsmessungen an Maschinen verschiedenster Bauart, Leistung, Frequenz und Phasenzahl* ausgeführt, die relativ grosse Zusatzverluste besaßen, um sichere Ergebnisse zu liefern. Die Gesamtverluste wurden dabei nach der Zurückarbeitungsmethode durch Kreisschaltung zweier unter sich gleicher, starr gekuppelter Maschinen festgestellt. Die Reibungs-, Eisen- und Kurzschlussverluste wurden getrennt durch einen Hilfsmotor gemessen.

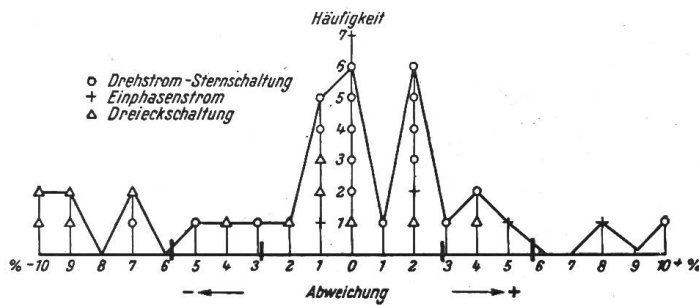


Fig. 24

In Tabelle III sind die Ergebnisse dieser Messungen zusammengestellt. Die Kreisschaltung wurde zum Vergleich gewählt, *weil es nur bei dieser möglich ist, die tatsächlichen Verluste mit genügender Genauigkeit zu messen*; ohne dass man Differenzen zwischen zu- und abgeführter Leistung bilden müsste. Die Verlustleistung der beiden gekuppelten Maschinen wurde dabei teils elektrisch, teils mechanisch zugeführt. Da immer die eine der Maschinen ein etwas stärkeres, die andere ein etwas schwächeres Feld besitzt, als es der Klemmenspannung nach Fig. 1 entspricht, so hebt sich die Änderung der Eisenverluste beider Maschinen mit der Belastung gegenseitig nahezu auf. Die Kreisschaltung kann daher zum Nachweis der Eisenverluständerung, die wir am Anfang als unerheblich hinstellten, nicht verwendet werden.

Man kann die Zusatzverluste noch auf eine andere Weise messen, indem man nämlich die Maschine *als übererregten oder untererregten Synchronmotor im Leerlauf von einer fremden Stromquelle* betreibt und die Erregung

hierbei so einstellt, dass in der Ständerwicklung der normale Strom fließt. Auch hierbei entwickeln sich genau wie beim Kurzschlusslauf und bei Belastung alle parasitären Streufelder und Zusatzverluste. Jedoch ist die Messung wegen des schlechten Leistungsfaktors nicht ganz einwandfrei, während sie beim Kurzschlusslauf durch Eichung des Antriebsmotors recht sauber auszuführen ist. Will man die Änderung der Eisenverluste, die bei diesem Synchronlauf mit $\cos \varphi = 0$ nach Fig. 1 zu stark in Erscheinung tritt, herauschaffen, so muss man *zwei Messungen mit Uebererregung und Untererregung* vornehmen und das Mittel aus beiden Verlusten gebrauchen.

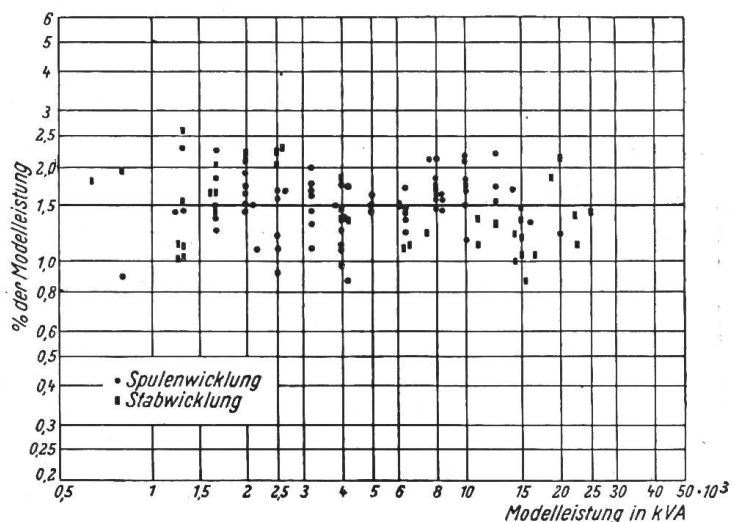


Fig. 25

In Tabelle III sind in den Spalten 1 bis 4 die Nennwerte der untersuchten Maschinen und die Belastungen des jeweiligen Versuchs eingetragen. Die Spalten 5 bis 11 zeigen die verschiedenartigen gemessenen Verluste, und zwar Spalte 5 bis 7 die Reibungs-, Eisen- und Stromwärmeverluste, die man gewöhnlich als massgebend ansieht, Spalte 8 die Kurzschlussverluste nach der soeben beschriebenen Methode, Spalte 9 und 10 zeigen den Unterschied zwischen den Summen der Reibungs-, Eisen- und Stromwärmeverluste einerseits und den Kurzschlussverlusten andererseits, und Spalte 11 gibt die in Kreisschaltung direkt gemessenen Gesamtverluste an. Man erkennt, dass diese sich nur unwesentlich von der Verlustsumme der Spalte 10 unterscheiden.

Zur besseren Verdeutlichung ist in Spalte 12 der Unterschied in Prozenten angegeben. In Spalte 13 ist schliesslich die Grösse der Zusatzverluste als Prozentsatz der Gesamtverluste angegeben, der überall eine erhebliche Rolle in der Verlustbilanz der Maschine spielt.

Aus Spalte 12 erkennt man, dass die Abweichungen zwischen den Leerlaufkurzschlussverlusten und den direkt gemessenen Verlusten bei Normallast im allgemeinen sehr gering sind und völlig innerhalb der Genauigkeitsgrenzen der üblichen Verlustmessungen liegen. Nur bei drei Punkten sind grössere Abweichungen

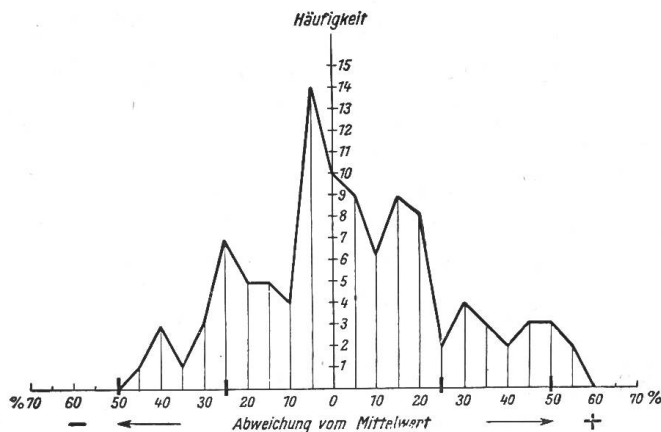


Fig. 26

von 10 bis 15 % vorhanden. Hier handelt es sich um eine Maschine mit Dreieckschaltung und um Messpunkte bei $\cos \varphi = 1$, bei der dreifach harmonische Ströme in der Wicklung fließen können. Jede Abweichung des Ständerstromes von der Sinusform erzeugt nun aber zusätzliche Oberfelder oder Verzerrungen der Feldkurve, die natürlich auch verstärkte Zusatzverluste hervorrufen.

Um einen graphischen Ueberblick über diese Messungen zu erhalten, ist in Fig. 24 die Häufigkeit der verschiedenen Abweichungen der Verluste aufgetragen. Man erhält dadurch eine „Fehlerkurve“, aus der sich, unter Ausschaltung der drei eben genannten Ausreisserpunkte, ein mittlerer Fehler von nur 3 % ergibt. Die Messung der Zusatzverluste durch die Kurzschlussprobe ist hiernach für den praktischen Bedarf hinreichend genau, denn mit geringeren Fehlern als 3 % der Gesamtverluste sind auch die andern Einzelverlustmessungen für die Wirkungsgradbestimmung kaum behaftet.

Bezeichnet man den doppelten mittleren Fehler als „Toleranz“, so kann man durch die Fehlertheorie nachweisen, dass die beiden Toleranzgrenzen rechts und links vom Mittelwert eine solche Lage haben, dass bei sehr zahlreichen Messungen 95 % aller Messpunkte innerhalb des Toleranzbereiches liegen und nur je 2,5 % über und unter dem Toleranzgebiete. In Fig. 24 ist die Lage der mittleren Fehler und der Toleranzgrenzen fett eingetragen.

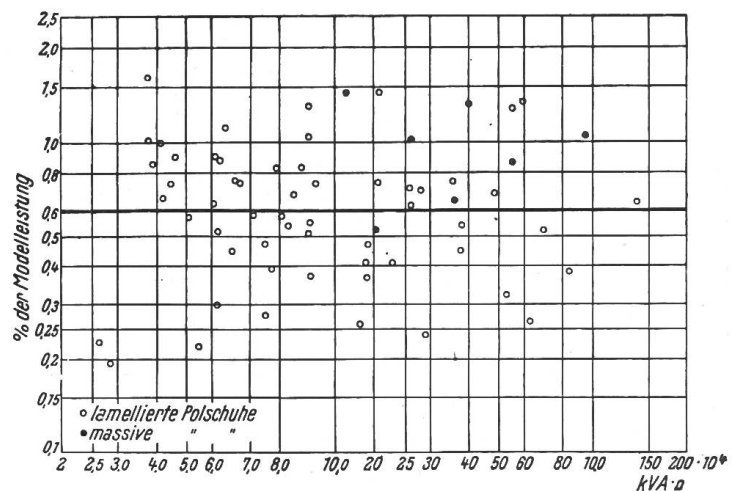


Fig. 27

Nach der hier geschilderten Methode sind zahlreiche Synchronmaschinen auf Zusatzverluste durchgemessen, um Unterlagen für *die tatsächliche Grösse der Verluste* zu erhalten. Fig. 25 zeigt das Ergebnis solcher Messungen für *Turbogeneratoren*, vor allem für 3000 und 1500 U/min. Man muss hier im Mittel mit 1,5 % der *Modellleistung in kVA als Zusatzverlust* rechnen, der zu den regulären Stromwärmeverlusten zu addieren ist. Ein erheblicher Unterschied der verschiedenen Bauarten, z. B. von Stabwicklung und Spulenwicklung, oder eine Abhängigkeit von der Leistung bei sonst gleicher Bauweise und Anordnung hat sich nicht herausgestellt. Die Abweichungen der äussersten Punkte vom Mittelwert sind ziemlich gross. Auf Grund der Fehlerkurve von Fig. 26 beträgt die mittlere Abweichung 25 %, die *Toleranz der Zusatzverluste daher ± 50 %*.

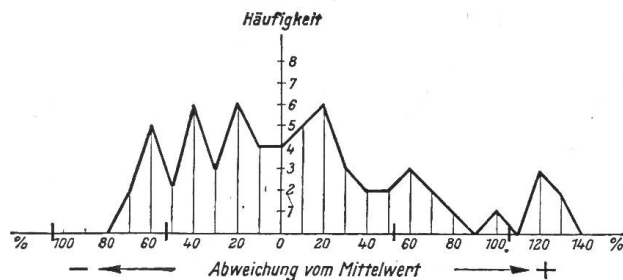


Fig. 23

Wesentlich geringer sind die Zusatzverluste in *Schwungradgeneratoren*, die in Fig. 27 aufgetragen sind. Sie betragen hier im Mittel 0,6 % der *Modelleistung in kVA*. Eine Abhängigkeit von der Leistung oder Drehzahl hat sich nicht ergeben, doch scheint es, dass die Verluste bei massiven Polschuhen höher liegen als bei lamellierten. Die Zahl der Messungen reicht jedoch zur Mittelwertbildung kaum aus. Massive Pole sind allerdings nur dort angewandt worden, wo die Zahnfelder auf Grund der obengenannten Formeln relativ gering waren. Die Verschiedenheit der Zusatzverluste ist bei Schwungradgeneratoren recht gross. Auf Grund der Fehlerkurve von Fig. 28 ist die mittlere Abweichung 52 %, die *Toleranz daher ± 105 %*.

Man erkennt hieraus, dass es im Interesse der Bewertung jeder einzelnen Maschine richtig ist, sich bei Synchronmaschinen nicht auf Angaben von Mittelwerten für die Zusatzverluste zu beschränken, sondern dass man besser *die genaue Messung nach der Kurzschlussmethode* vornimmt. Demgemäss ist es auch zweckmässig, die Zusatzverluste einer neuartigen Maschine auf Grund der anfangs mitgeteilten Formeln, in denen sich die verschiedenen Teilabmessungen der Maschine widerspiegeln, richtig vorausbestimmen und sich nicht auf den Zufall zu verlassen.

Die Entwicklung der Elektrizitätsgesetzgebung in verschiedenen Ländern.

Von Dr. ing. G. Siegel, Berlin.

Der Autor berichtet in diesem ersten Teil über die Entwicklung, teilweise auch über die wichtigsten Bestimmungen der Elektrizitätsgesetzgebung in der Schweiz, in Deutschland, Oesterreich und in den ost- und nordeuropäischen Staaten.

In einem noch folgenden zweiten Teile wird die Studie auch auf die süd- und westeuropäischen und die wichtigsten Staaten anderer Kontinente ausgedehnt werden.

L'auteur rend compte du développement qu'à pris la législation sur les installations électriques en Suisse, en Allemagne, Tchécoslovaquie, Hongrie, Roumanie, Yougoslavie, Grèce, Pologne, Russie, Lettonie et les Etats scandinaves. Il énumère les points caractéristiques.

Dans une seconde partie, il étendra son étude aux états européens de l'ouest et aux principaux états extra-européens.

Die politischen, wirtschaftlichen und sozialen Beziehungen der Menschen untereinander sind durch den Krieg verwirrt, gestört und teilweise zerrissen. Ihre Wiederherstellung und Neuregelung ist überwiegend Sache des Staates und der Gesetzgebung. Von diesem Standpunkt aus erscheint es natürlich, dass auch die *Elektrizitätswirtschaft* in zahlreichen Kulturstaaten in vermehrtem Umfange Gegenstand der Gesetzgebung geworden ist. Hierüber in der Schweiz zu berichten, in einem Lande, wo die Elektrizitätswirtschaft sich in durchaus geregelten Bahnen fortent-