

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 auf E-Periodica. 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. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

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. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

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. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 23.02.2026

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 cokerie 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 couteuses.

Zusätzliche Verluste in Synchronmaschinen und ihre Messung.

Von Reinhold Rüdenberg, Charlottenburg.

(Fortsetzung und Schluss.)

Nachdem der Autor im ersten Teile 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 Stosskurzschlusstromes 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 fliest. Dann bilden sich nach dem früher Gesagten nicht nur die Nuten- und

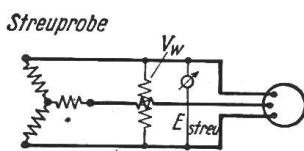
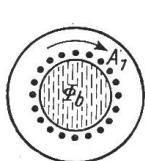


Fig. 15

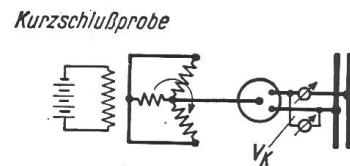
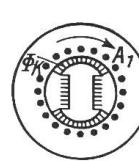


Fig. 16

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 Ständerstreuspannung durch die Wicklung treibt. Dieses Kurzschlussfeld verhält sich zum normalen Hauptfeld wie die Ständerstreuspannung zur Normalspannung, und die Ständerstreuspannung erhält man aus der bei der Streuprobe gemessenen totalen Spannung E_{streu} durch Abzug der Bohrfeldspannung. 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 Doppelsternschaltung 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

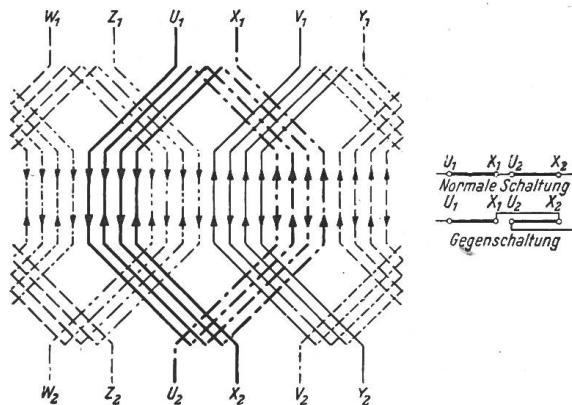


Fig. 17

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 Isolermitteln, 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 Stirnstreuefelder 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

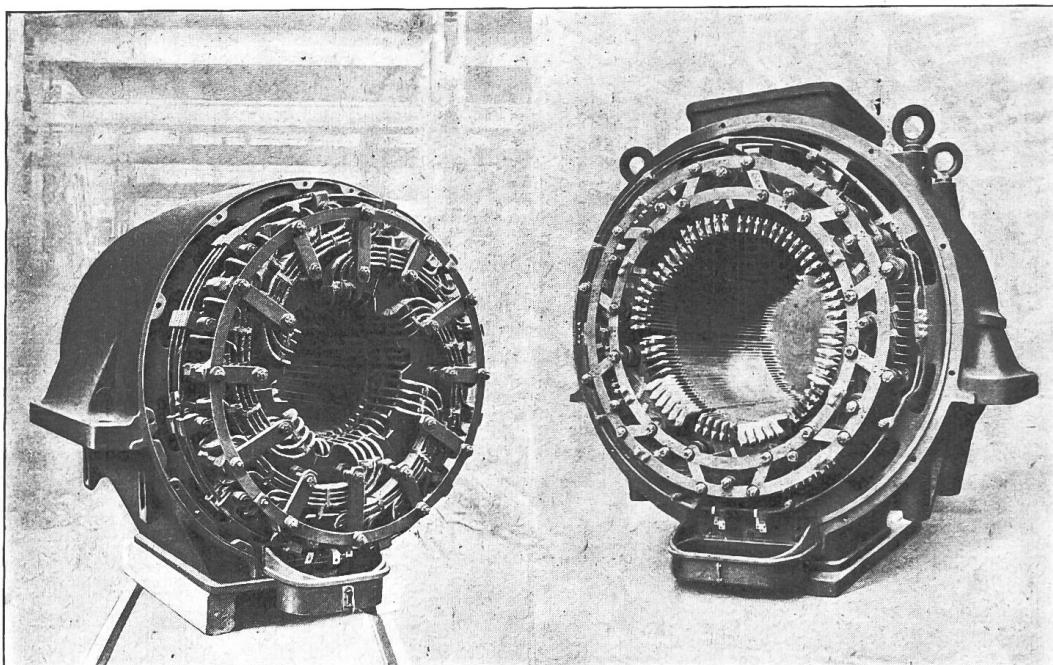


Fig. 19

Fig. 18

vollständige Konstanz der Verluste zwischen 0 und 100°C vorhanden ist. Dies röhrt 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

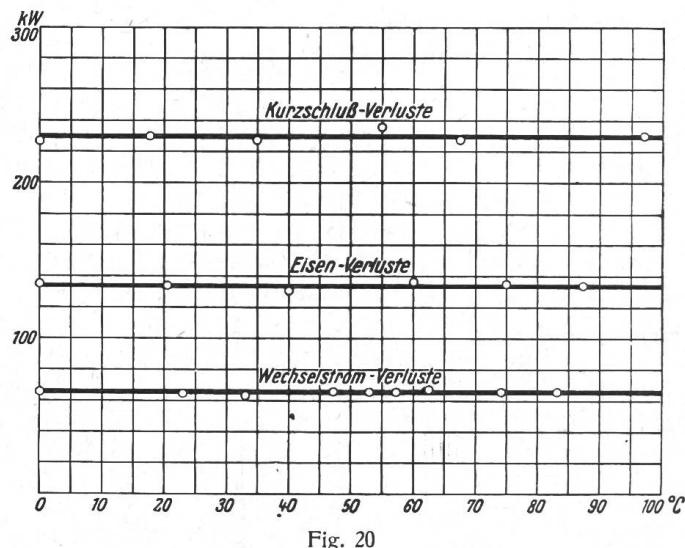


Fig. 20

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 röhrt 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 Kühlung 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

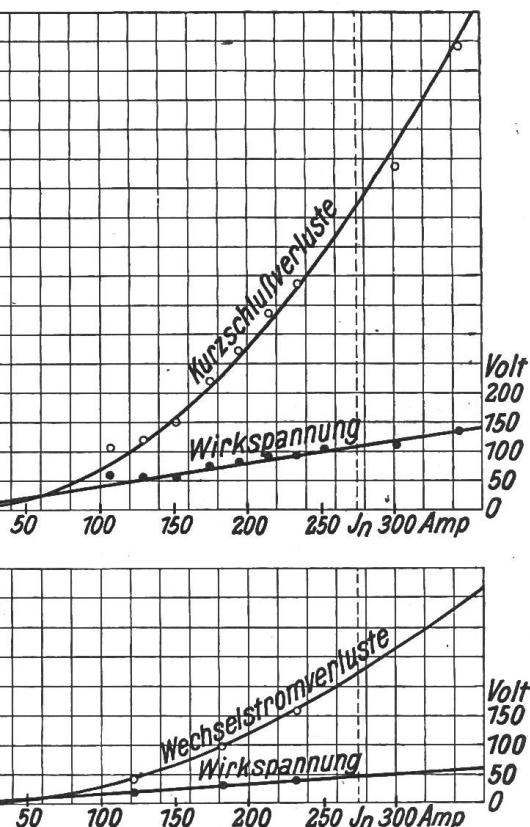


Fig. 21

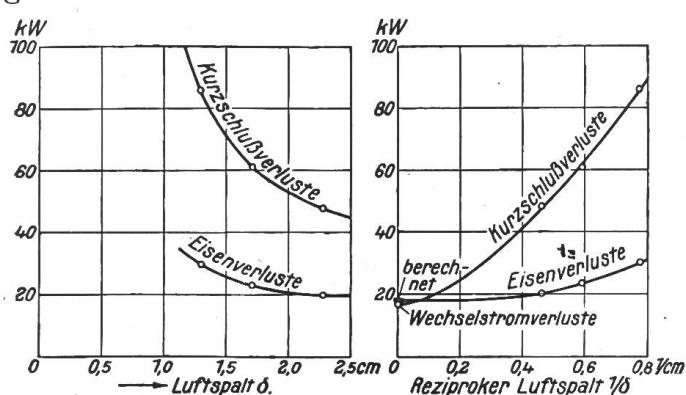


Fig. 22

Fig. 23

Verschachtelung der verschiedenen Phasenleiter 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.

Grund der Verlustziffer des Eisens 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 röhrt 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
	E	I		Reibung	Eisen	$I^2 R 40^\circ$	Kurz-schluss	$\Sigma V_{R+E+I^2 R}$	ΣV_{R+E+K}	direkt gem.				
	Volt	Amp.	$\cos \varphi$	kW	kW	kW	kW	kW	kW	kW	%	%		
12 000 kVA	5005	1155	0,99	330	310	64	261	704	901	910	- 1,0	29,2	Schenkel-polläufer Kreis-schaltung	
5 000 Volt λ	5000	1380	0,78	330	316	91	372	731	1012	1007	+ 0,5	38,2		
1380 A	5500	1155	0,69	330	374	64	259	768	963	946	+ 1,7	23		
300 U/min	5000	1500	0,67	330	312	107	432	749	1074	1066	+ 0,6	42,5		
50 Per/sec	5380	1320	0,98	330	356	83	340	769	1026	1039	- 1,3	35		
10 000 kVA													Zylinder-läufer Kreis-schaltung	
5000 Volt	3930	1180	0,98	339	115	48	270	502	724	781	- 7,2	55,0		
1160 A														
1500 U/min	5010	1170	0,56	339	191	57	266	577	796	783	+ 1,7	36,8		
4500 kVA	5432	373	0	88,5	57,5	7,2	29,3	153,2	174,8	183,5	- 4,6	19,2	Zylinder-läufer Ueber-erregter Synchron-motor	
5250 Volt λ	5304	392	0	88,5	54,5	7,8	32,1	150,8	175,1	180,6	- 3,0	20,0		
495 A	5232	333	0	88,5	51,9	5,7	24,2	146,1	164,6	165,4	- 0,5	12,6		
3000 U/min	5200	294	0	88,5	50,8	4,5	19,9	143,8	159,2	156,3	+ 1,8	8,0		
50 Per/sec	5232	247	0	88,5	50,2	3,2	15,3	141,9	154,0	147,5	+ 4,4	4,2		
	5216	186	0	88,5	49,5	1,8	10,3	139,8	148,3	144,1	+ 2,5	2,8		
	208	950	1,0	89	11	2,3	20	102,3	120	117	+ 2,5	14,6	Δ Schaltung	
	360	1750	0,58	89	30	8	43	127	162	163	- 0,6	28,2		
	450	2470	0,62	89	45	16	77	150	211	212	- 0,5	41,0		
	450	2470	0,78	89	45	16	77	150	211	219	- 3,6	46,0		
3140 kVA	450	2610	1,0	89	45	18	85	152	219	245	- 10,4	61,0		
530 Volt Δ	520	3140	0,59	89	63	26	124	178	276	282	- 2,0	58,8		
3430 A	520	3350	0,79	89	63	29	140	181	292	322	- 9,2	78,0		
3000 U/min	520	3370	1,0	89	63	29	142	181	294	336	- 12,4	85,8		
50 Per/sec	520	3500	0	89	63	32	155	184	307	296	+ 3,6	61,0		
	520	3230	0,80	89	63	27	132	179	284	313	- 9,3	74,2		
	520	3550	1,0	89	63	33	161	185	313	366	- 14,5	98,0		
	545	3350	0	89	73	29	140	191	302	307	- 1,5	60,5		
	543	3500	0,75	89	72	32	155	194	316	341	- 7,2	75,6		
	543	3780	0,87	89	72	37	184	199	345	382	- 9,6	91,5		
3530 kVA													Kreis-schaltung	
3500 Volt λ	3445	578	0,86	143	93	29	80	265	316	318	- 0,5	20,0		
582 A	2875	432	0,81	143	60	16	40	219	242	242	0	10,5		
1500 U/min	2290	304	0,82	143	36	8	20	187	199	181	+ 10,0	- 1,7		
25 Per/sec	3280	302	0,70	143	82	8	20	233	245	244	+ 0,3	5,0		
4500 kVA													Einphasig Kreis-schaltung	
3350 Volt \circ	3300	870	0,88	111	143	21	155	275	409	387	+ 5,5	40,8		
1340 A	2750	880	0,42	111	99	22	157	231	367	338	+ 8,5	46,2		
1000 U/min	2670	622	0,94	111	91	11	83	213	286	290	- 1,3	35,5		
16 $\frac{2}{3}$ Per/sec	2650	1070	0,97	111	91	32	225	234	427	420	+ 1,6	80,0		
	2200	846	1,0	111	62	20	145	193	318	311	+ 2,2	65,0		

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 beladen. *Man kann hier-nach 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.

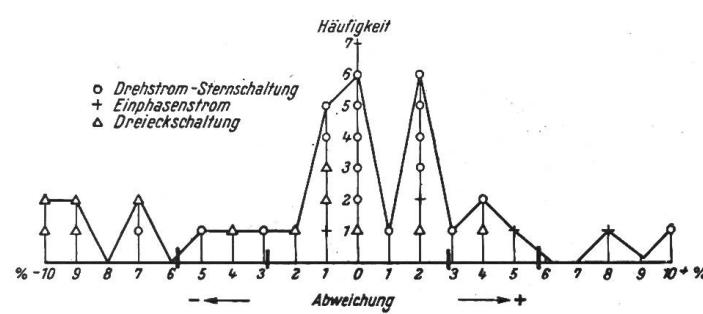


Fig. 24

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 abgeföhrter Leistung bilden müsste. Die Verlustleistung der beiden gekuppelten Maschinen wurde dabei teils elektrisch, teils mechanisch zugeführt. Da immer die eine der Maschinen 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 Übererregung und Untererregung vornehmen und das Mittel aus beiden Verlusten gebrauchen.

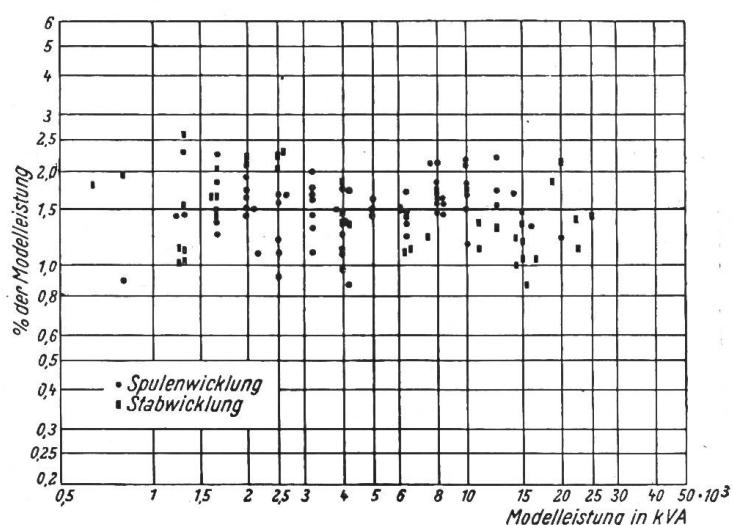


Fig. 25

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 anderseits, 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

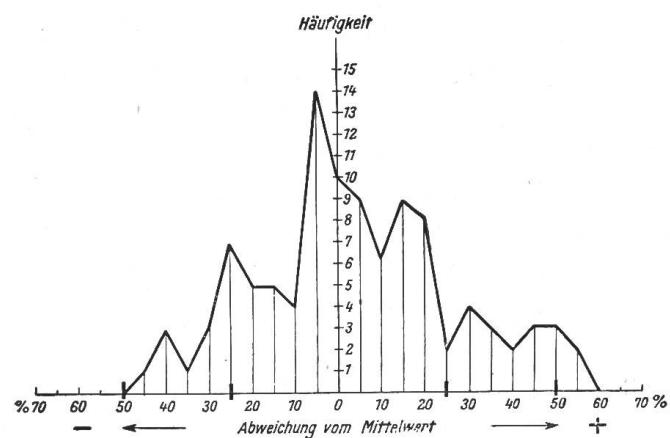


Fig. 26

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 Ausreisepunkte, 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.

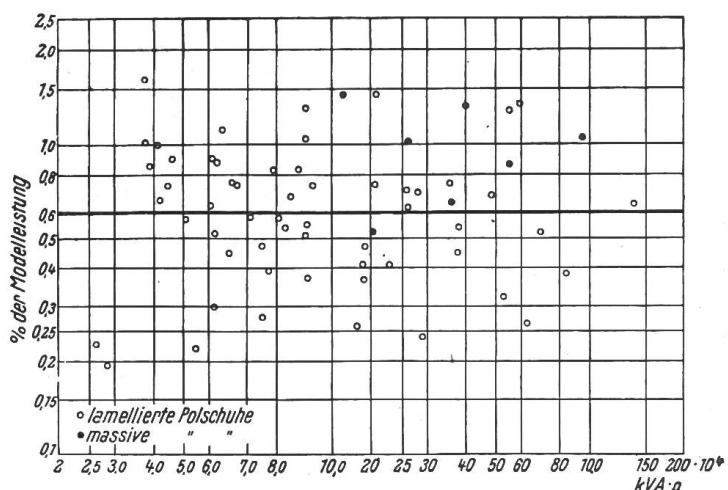


Fig. 27

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 $\pm 50\%$.

Wesentlich geringer sind die Zusatzverluste in Schwungradgeneratoren, die in Fig. 27 aufgetragen sind. Sie betragen hier im Mittel 0,6 % der Modellleistung in kVA. Eine Abhängigkeit von der Leistung oder Drehzahl hat sich nicht ergeben, doch scheint es, dass die Ver-

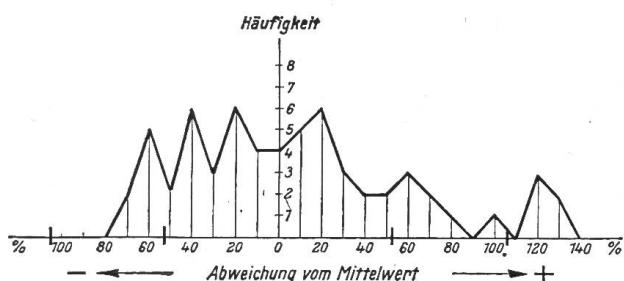


Fig. 23

luste bei massiven Polschuhen höher liegen als bei lamellierte. Die Zahl der Messungen reicht jedoch zur Mittelwertsbildung kaum aus. Massive Pole sind allerdings nur dort angewandt worden, wo die Zahnenfelder 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 $\pm 105\%$.

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 Teilmessungen der Maschine wiederspiegeln, 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.

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-

L'auteur rend compte du développement qu'à pris la législation sur les installations électriques en Suisse, en Allemagne, Tschechoslovaquie, Hongrie, Roumanie, Jugoslavie, 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.