**Zeitschrift:** Bulletin de l'Association suisse des électriciens
**Herausgeber:** Association suisse des électriciens
**Band:** 15 (1924)
**Heft:** 8

**Artikel:** Über grosse Turbogeneratoren für 3000 Touren pro Minute
**Autor:** Rikli, H.
**DOI:** https://doi.org/10.5169/seals-1057082

**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:** 22.08.2025

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

Abgabe von Fasern an das Filtrat keine elektrisch einwandfreien Oele ergebe. Dieser Vorwurf gilt jedoch nur bei Verwendung von schlechten, ungeeigneten Filtrierpapieren, die ein schlechtes Gefüge aufweisen. Filtrierpapiere müssen vor der Verwendung auf Saugfähigkeit, Gefüge, Dichtigkeit, eventuelle Faserabgabe geprüft werden. Gute Papiere sind von zuverlässigen Fabrikanten ohne weiteres zu bekommen.

Der öllösliche Schlamm wird bei diesem Reinigungsverfahren infolge der niedrigen Arbeitstemperatur vollständig von der Filterpresse zurückgehalten. Das gelöste Wasser wird ebenfalls entfernt. Da die Arbeitstemperatur während des Filtrierprozesses nicht gesteigert wird und nicht gesteigert werden kann, weil bei höhern Temperaturen der Dampfdruck des Wassers, das im Filtrierpapier enthalten ist, grösser wird, als die adsorptive Kraft des letztern, was zur Folge hätte, dass Wasser an das Oel abgegeben würde, so kann sich auch nicht übermässig viel Wasser im Oel lösen. Die Werte für die Durchschlagsfestigkeit von sorgfältig filtrierten Oelen stehen auch in keiner Weise hinter denjenigen zurück, die zentrifugiert worden sind, mit dem Unterschied, dass sich nicht nachträglich die Wasserausscheidungen einstellen.

Aus obigen Ausführungen ergibt sich, dass das Zentrifugieren nicht als ein verbesserter Weg für Isolierölreinigung angesehen werden kann, da gerade die neuesten Erkenntnisse betreffend die verschiedenen Verteilungsgrade von Wasser in Oel und die damit zusammenhängende Beeinflussung der elektrischen Festigkeit, sowie Ausscheidung und Kenntnis des öllöslichen Schlammanteiles (es gibt Oele, die sehr viele solcher Oxydationsprodukte bilden) nicht berücksichtigt worden sind.

---

# Ueber grosse Turbogeneratoren für 3000 Touren pro Minute.

Von Oberingenieur *H. Rikli*, Zürich.

*Der Verfasser beschreibt an Hand einer Ausführung den heutigen Stand im Bau von hochtourigen Turbogeneratoren unter Anwendung von Aluminiumwicklungen. Es werden besondere Massnahmen besprochen zur Erhöhung der mechanischen Sicherheit und gezeigt, wie durch ständige Kontrolle während der Fabrikation die hochbeanspruchten Teile auf ihre Zuverlässigkeit geprüft werden. Es werden Angaben über Zusatzverluste in solchen Maschinen gemacht und die Messung solcher.*

*L'auteur décrit un turboalternateur moderne à très grande vitesse avec enroulement excitateur en aluminium et parle des dispositions à prendre au point de vue construction et pendant la fabrication pour assurer la résistance mécanique de pareilles machines. Il donne des indications sur les pertes additionnelles et sur une méthode simple pour les déterminer.*

Kaum ein Gebiet des Maschinenbaues hat in den letzten zehn Jahren eine so rasche Entwicklung durchgemacht als der Bau von Turbogeneratoren. Diese Entwicklung ist von mir in einem Aufsatz im Oktoberheft 1922 der Schweiz. Bauzeitung kurz skizziert worden, auch verschiedene andere Autoren haben seither über dieses Thema geschrieben[1]). Im nachfolgenden sollen nun als ungefähres Beispiel heutigen Standes im Bau solcher Maschinen Turbogeneratoren beschrieben werden, wie sie in den Jahren 1920—23 durch die Maschinenfabrik Oerlikon in drei Ausführungen an die City of London Electric Lighting Co. in London geliefert wurden. Die Generatoren dieser Dampfturbinengruppen sind für folgende Verhältnisse gebaut:

15 600 kVA
11 000 Volt
cos $\varphi$ 0,8
3000 Touren pro Minute, 50 Perioden.

[1]) So z. B.: E. Roth, Belfort: Les progrés réalisés dans la construction des turboalternateurs de grandes puissances, Revue Générale d'Electricité, 27 janvier 1923;
Dr. ing. Rob. Pohl, Berlin: Fortschritte im Turbogeneratorenbau, Elektrotechn. Zeitschrift, Heft 31 und 32, 1923.

Zur Zeit, als die ersten beiden Gruppen angefragt und in Auftrag gegeben wurden — im Jahre 1919 — waren Einheiten solcher Leistung für 3000 Touren pro Minute noch eine Seltenheit; und wenn schon verschiedene seriöse Konstruktionsfirmen die Ausführbarkeit solcher Einheiten als durchaus möglich und sicher bezeichnen konnten, so vermochten sich die Betriebsleiter doch lange nicht zu entschliessen, den entsprechenden Schritt vorwärts zu tun und solche Gruppen in Auftrag zu geben. Noch im Jahre 1920 wurde häufig für Leistungen über 10 000 kW den 1500 tourigen Gruppen „aus Gründen der Sicherheit" der Vorzug gegeben.

Es waren nun gerade diese Gründe, welche dazu führten, beim Bau dieser grossen 3000 tourigen Einheiten aussergewöhnliche Wege zu beschreiten. Günstige Erfahrungen, welche während des Krieges an Turbogeneratoren gemacht wurden, die Rotorwicklungen aus Aluminium erhalten hatten, bewogen die Erbauerin, ihre 3000 tourigen Einheiten schon von 8000 kVA an mit Rotorwicklungen aus Aluminium auszuführen, obschon dadurch das Erwärmungsproblem, eine an sich schon nicht leichte Sache, durch die geringere Leitfähigkeit des Aluminiums (nur zirka 60% von derjenigen des Kupfers) noch bedeutend erschwert wurde. Eine vorzügliche Ventilation der Rotorwicklung erlaubte aber in der Mehrbelastung des Rotors noch bedeutende Entwicklungen. Dann konnte, trotz erhöhter mechanischer Sicherheit gegenüber einer Konstruktion mit Kupferwicklung, der Rotordurchmesser gegenüber einer solchen vergrössert werden. Die Umfangsgeschwindigkeit der Rotoren dieser Maschinen beträgt zirka 145 m/sec bei 3000 Touren pro min. Die gleiche Umfangsgeschwindigkeit wird auch für Einheiten bis 25 000 und 30 000 kVA Leistung beibehalten, welche eine Verbreiterung der für London gebauten Einheiten darstellen.

In Fig. 1 ist ein Rotor der an „City of London" gelieferten Generatoren dargestellt. Der Rotorkörper besteht mitsamt der Welle aus einem massiven Schmiede-

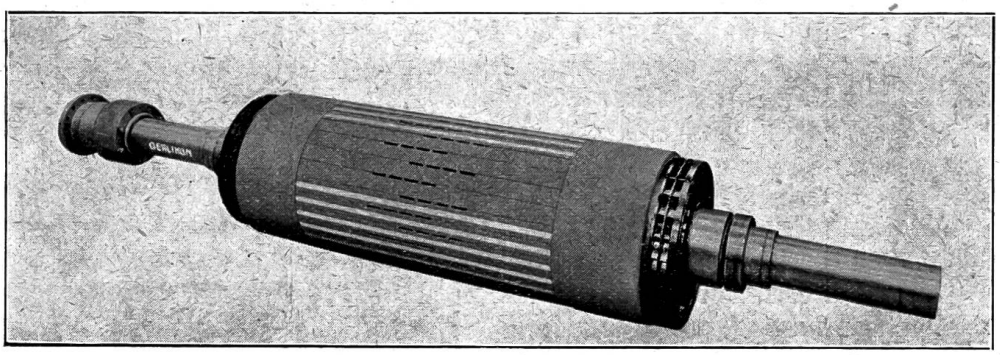

Fig. 1.

stück aus vergütetem Chromnickelstahl, in welchem die Nuten für Wicklung und Ventilation aus dem Vollen herausgearbeitet werden. Diese Stahlqualität weist eine Bruchfestigkeit auf von 7000—7500 kg/cm² bei 4500 kg/cm² Streckgrenze und zirka 18 % Dehnung und hat eine Kerbschlagarbeit von 8—10 kg/cm² bei einem eingekerbten Probestab von 10×10 mm Querschnitt. Wichtig für den Konstrukteur ist natürlich die genaue Materialkenntnis auch im Innern des Rotorballens, da hier im Betriebe die höchsten Spannungen auftreten. Zu diesem Zwecke werden solche Rotorkörper der ganzen Länge nach mit Spezialwerkzeug, welches einen sogenannten Bohrkern stehen lässt, zentral durchbohrt. An dem Bohrkern müssen obige Zahlen ebenfalls nachgewiesen werden. Zugleich gestattet das Bohrloch eine genaue Kontrolle des Rotorinneren auf Lunker- und Rissfreiheit, beides unumgänglich notwendige Bedingungen für die Sicherheit eines solchen Rotorkörpers. Durch die Durchbohrung wird zwar die Beanspruchung im Zentrum des Rotorkörpers verdoppelt im Vergleich zu einem Rotorkörper ohne Bohrung, aber es ist doch das einzige Mittel, die Fehlerlosigkeit des Materials im Innern zu kontrollieren, während das Vorhandensein von

Lunkerstellen und Rissen infolge ihrer scharfen Umgrenzungen örtliche Beanspruchungen bis auf den 4fachen Wert ergeben können. Eine der vornehmsten Aufgaben im Turbogeneratorenbau ist die einwandfreie Prüfung des Konstruktionsmaterials vor und während der Fabrikation. Zu diesem Zwecke wurde eigens für die Bohrlochkontrolle ein sinnreicher Apparat konstruiert, welcher gestattet, die ganze Bohrlochwandung Zentimeter für Zentimeter in der ganzen Länge auf das genaueste zu untersuchen und die kleinsten Unregelmässigkeiten deutlich zu erkennen. In Fig. 2 und 3 ist dieser Apparat und seine Wirkungsweise dargestellt. Derselbe besteht aus einem kleinen Wagen, der mittels zweier federnden Zentriervorrichtungen genau in die Mitte des Bohrloches gestellt wird. Die Zentriervorrichtung trägt an ihren sechs Hebeln je eine kleine Stahlrolle, welche sich an die Bohrung anlegen lässt und auf welchen der Apparat mit einer langen Stange auf der ganzen Länge des Bohrloches verschoben werden kann. Vorn am Apparat befindet sich die Lampe zur Beleuchtung der Bohrlochwandung und vor derselben ein versilberter Spiegel in Konusform, welcher das Bild des betr. Wandungsteiles nach dem Schema der Fig. 3 einem Teleskop zuführt, in welchem es in stark vergrössertem Masstab betrachtet werden kann. Fig. 4 zeigt das Bild einer gesunden Bohrlochstelle, wie es durch das Teleskop photographiert wurde. Die drei verschwommenen Schatten unter 120° rühren von den drei Spiegelhalterdrähten her, deren Schatten auf die Bohrlochwandung fällt. Der obere scharfe Strich ist kein Materialriss, sondern eine oberflächliche Kerbe, herrührend vom Ausfahren des Bohrers. Man kann an dem Bilde deutlich als konzentrische Kreise die feinen Bohrrillen erkennen und sehen, dass die Bohrlochwandung von einwandfreier Beschaffenheit ist.

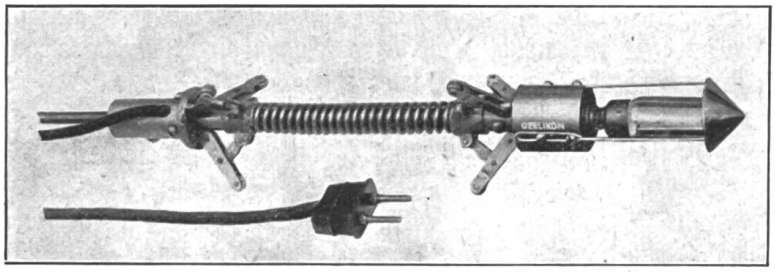


Fig. 2.

Der Beleuchtungs-Spiegelapparat zur Untersuchung des Bohrloches.

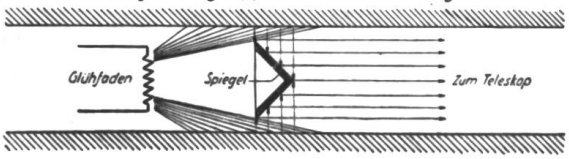


Fig. 3.

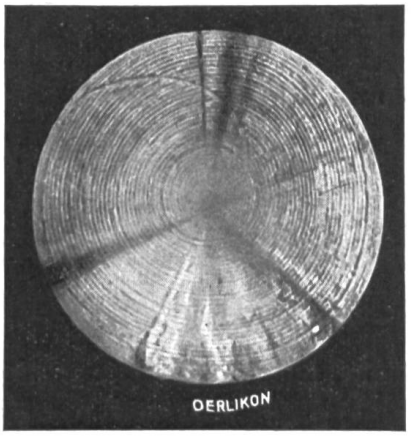


Fig. 4.

Neben dieser wichtigen Kontrolle und der eingehenden Prüfung der Materialfestigkeit an verschiedenen Stellen des Rotorkörpers wird aber als wichtigste Schlussprüfung in genutetem Zustande noch eine Schleuderprobe mit erheblich gesteigerter Drehzahl ausgeführt, wobei der Rotorkörper ein gewisses Mass bleibender Dehnung nicht überschreiten darf. Dieser Betrag ist freilich so klein, dass er nur mit verfeinerten Messmethoden konstatiert werden kann und erreicht bei den Rotoren der oben genannten Generatoren kaum 0,1 mm als maximal zulässigen Betrag. In Wirklichkeit bleiben aber die Drehungen in der Regel noch weit unter diesem Mass. Zur Messung so kleiner Differenzen ist ein spezieller Apparat gebaut worden, welcher Vergleichsmessungen auch an so grossen Objekten wie diese Rotorkörper auf 0,001 mm Genauigkeit gestattet. Erst nachdem durch die Schleuderprobe die einwandfreie Sicherheit eines Rotorkörpers erwiesen ist, wird derselbe fertiggestellt und bewickelt.

Die Rotorwicklung der Generatoren für „City of London“ besteht, wie bereits oben angedeutet, aus Aluminiumband. Die Spulen werden auf Schablonen gewickelt, wo sie die genaue, nachher im Rotor einzunehmende Form erhalten und werden in die Rotornuten Windung für Windung flach aufeinander eingelegt, unter Zwischenlage von Mikanit von zirka 0,4 mm Stärke. Ebenso sind die Nuten mit starkwandigen Mikanitkanälen ausgelegt. Dieselben sind vorher auf Eisenschablonen hergestellt und mit hoher Temperatur eingebrannt worden. Auch die Wicklungsköpfe sind von den sie tragenden Kappen durch Mikanit isoliert. Die Isolation des Rotors ist also eine ganz vorzügliche und hitzebeständige, was auch durch folgenden Versuch demonstriert wird. Ein bewickelter Rotorkörper wurde mehrere Male auf über 150° C erwärmt und in diesem Zustande während je einer halben Stunde mit erheblich gesteigerter Drehzahl laufen gelassen. Der Rotor hielt darauf eine Isolationsprobe von 5000 Volt aus und eine nachherige Kontrolle der Isolation nach Demontage der Wicklung zeigte, dass dieselbe weder durch die hohe Temperatur noch durch die gleichzeitig auftretenden Zentrifugalkräfte irgendwie gelitten hatte. Durch die Anwendung des Aluminiums wird das Isolationsmaterial infolge niederer Pressung wesentlich geschont. Bei den Generatoren für „City of London“ ist die Pressung in den obersten Lagen trotz der hohen Umfangsgeschwindigkeit nur zirka 120 kg/cm², während sie bei Kupferwicklung und gleicher Rotorerwärmung auf zirka 300 kg/cm² ansteigen würde.

Der Hauptvorteil der Aluminiumwicklung liegt aber in der bedeutenden Herabsetzung der Beanspruchungen in Rotorkörper und Endkappen. Bei den Generatoren für „City of London“ liegt die Beanspruchung im Zentrum des Rotorkörpers unter Berücksichtigung der Durchbohrung noch etwas unter 1400 kg/cm² und in den engsten Zackenquerschnitten erreicht dieselbe nicht 700 kg/cm²; für Kupferwicklung, reduziert auf gleiche Rotorerwärmung, würden aber diese Beanspruchungen um 15 bezw. 45 % steigen. Noch günstiger liegen die Verhältnisse für die Aluminiumwicklung bei den Rotorendkappen, indem dort die maximalen Spannungen bei Kupferwicklung gegen 60 % höher ausfallen würden, was zu einer ganz wesentlichen Verstärkung der Rotorkappen führen müsste.

Im Elektro-Maschinenbau wird dem Aluminium als Wicklungsmaterial gewöhnlich wenig Vertrauen entgegengebracht. Dies rührt davon her, dass Verbindungsstellen im Aluminium im allgemeinen unsicher herzustellen sind, da sich Aluminium nicht löten lässt und auch Nietverbindungen aus Aluminium Schwierigkeiten bereiten. Diese Schwierigkeiten sind jedoch überwunden worden. Die Verbindungen der einzelnen Spulen der Rotorwicklung unter sich werden nach einem besondern Verfahren autogen geschweisst, nach welchem diese Arbeit sich so leicht und sicher ausführen lässt wie eine normale Lötstelle bei Kupferband. Die beiden Ableitungsstellen für die Kabelverbindung zu den Schleifringen, die natürlich aus Kupfer besteht, werden als sinnreich konstruierte Nietverbindung ausgeführt, welche der verschiedenen Ausdehnung von Aluminium und Kupfer in erster Linie Rechnung trägt und zudem dauernd unter solcher Pressung steht, dass ein Lockern der Verbindungsstelle unmöglich wird.

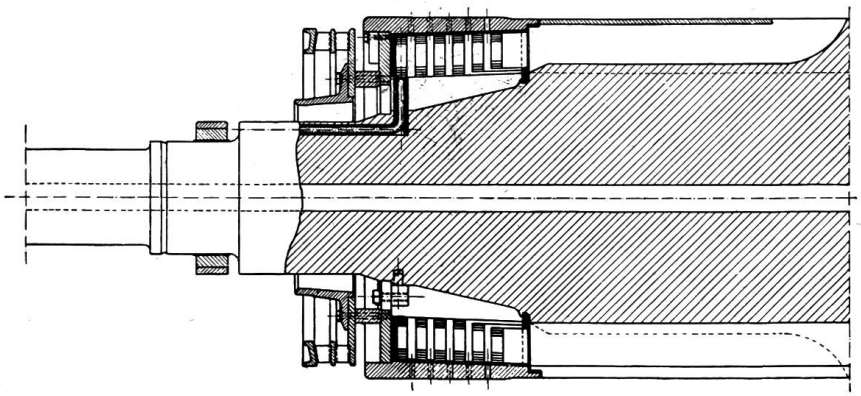

Fig. 5.

Es sind bereits eine grosse Anzahl Turbogeneratoren mit Rotorwicklungen aus Aluminium in Betrieb, einige derselben schon über 6 Jahre. Bei keinem hat sich irgendwie eine Störung oder anormale Erscheinung gezeigt.

Wie schon weiter oben angedeutet, war die erfolgreiche Verwendung des Aluminiums für die Rotorwicklung nur möglich durch die vorzügliche Ausbildung der Rotorventilation, wie in Fig. 5 (Längsschnitt durch einen Rotor) schematisch dargestellt. Die Kühlluft für das Innere des Rotors wird demselben beidseitig durch besondere axiale Ventilatoren mit spezieller Schaufelung zugeführt und kühlt zunächst in ausgiebiger Weise die Wicklungsköpfe, welche durch zahlreiche Luftschlitze unterteilt sind; ein Teil der Kühlluft entweicht dann durch diese Luftschlitze und durch korrespondierende Löcher in den Endkappen nach aussen; der Grossteil der Rotorkühlluft geht aber durch axiale Ventilationskanäle, welche zwischen den Wicklungsnuten und in den Polhörnern gelegen sind und eine grosse wirksame Kühlfläche aufweisen, nach der Mitte des Rotors, wo sie durch Oeffnungen in den relativ grossen Luftspalt zwischen Rotor und Stator gelangt, um sich dort mit der Kühlluft für diese letzteren zu vereinigen. Die Konstruktion dieser inneren Rotorkühlung ist so wirksam, dass die Rotoren mit 10 – 12 kW Erregerenergie pro 1 $m^2$ zylindrischer Rotoroberfläche belastet werden können, ohne dass die Wicklung die zulässige Erwärmung von 75° C überschreitet.

Die Statoren der drei Generatoren für „City of London" weisen im *Blechkörper eine kombinierte Radial- und Axialventilation* auf, die letztere war nötig wegen des hohen Blechrückens von 470 mm, welchen diese Maschinen aufweisen. Für die Radialventilation ist das Statorblech durch zahlreiche Luftschlitze in schmale Pakete unterteilt. Die Breite der Luftschlitze nimmt nach der Mitte der Maschine zu, um hier der vermehrten Luftzufuhr, welche von der Rotorventilation herrührt, genügende Querschnitte zu geben und so an diesen Stellen, wo sonst die höchsten Temperaturen auftreten, die günstigsten Abkühlungsverhältnisse zu schaffen. Die axialen Kühlkanäle im Statoreisen sind in zwei Reihen angeordnet, eine Reihe direkt hinter den Nuten; sie dient hauptsächlich zur Ableitung der in den Wicklungen der Nuten und in den Zacken entwickelten Wärme und eine zweite Reihe etwa in der Mitte der Höhe der Blechpakete, durch welche die Wirkung der radialen Kühlschlitze auf die Masse des Statoreisens unterstützt wird. Die Kühlluft tritt beidseitig axial in diese Kühlkanäle und verlässt sie in radial nach aussen gerichteten Oeffnungen derselben, welche in den mittleren, breiteren Kühlschlitzen angeordnet sind. Die Wirkung dieser Ventilationsanordnung ist eine sehr günstige, indem, wie die Versuche zeigten, eine sehr gleichmässige Erwärmung der Statoren auf ihre ganze Breite erreicht wurde.

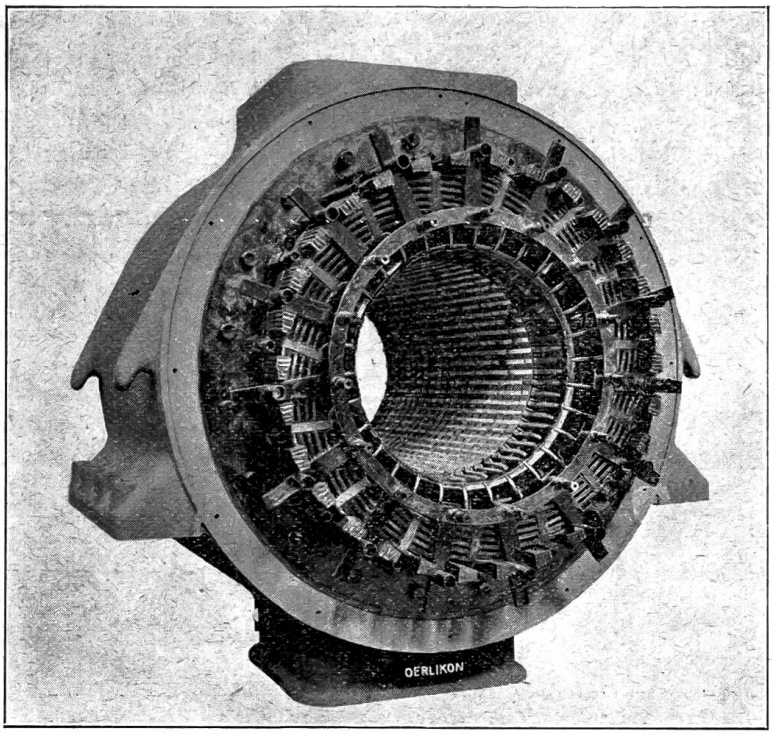


Fig. 6.

*Die Statorwicklung* der Generatoren für „City of London" ist als Gitterwicklung mit zwei Wicklungsebenen ausgeführt. Fig. 6 zeigt dieselben in fertigem Zustande, jedoch unter Weglassung des die Wicklungsköpfe überdeckenden Gehäuseringes. Die einzelnen Spulen sind als sogenannte Halbspulen ausgebildet, welche nach fertiger Montage, die sich infolge dieser Konstruktion sehr rasch und leicht herstellen lässt, durch reichliche Lötstellen zu geschlossenen Spulen vereinigt werden. Die Lötstellen sind in den am äusseren Umfange vorspringenden Köpfen leicht erkenntlich. Diese Konstruktion erlaubt es, die Windungsisolation jeder einzelnen Spule während der Fabrikation zu prüfen. Die Statorspulen für die Generatoren der „City of London" sind jede einzelne mit 12000 Volt, Windung gegen Windung, während je 15 Sekunden geprüft worden. Dieser Umstand ist von grosser Wichtigkeit, indem es erwiesen ist, dass zirka 90 % aller Spulendefekte von Wechselstromgeneratoren ihre Ursache in ungenügender Windungsisolation haben. Durch die vorzügliche Windungsisolation wird also die Betriebssicherheit dieser Generatoren stark erhöht.

Ein anderes Moment, das bei der Konstruktion der Statorwicklung grosser Einheiten volle Berücksichtigung finden muss, ist der *kurzschlussichere* Aufbau. Relativ hohe Streureaktanz und eine bis in alle Einzelheiten wohldurchdachte Abstützkonstruktion gewährleisten modernen Turbogeneratoren eine absolute Sicherheit gegen die hohen Beanspruchungen plötzlicher Kurzschlüsse. Auch die Statorwicklungen der Generatoren für „City of London" sind in dieser Beziehung nach den neuesten Gesichtspunkten aufgebaut, wie zum Teil aus Fig. 6 ersichtlich ist. Eine eingehendere Würdigung der Verhältnisse bei plötzlichem Kurzschluss und eine detaillierte Beschreibung der von der M. F. O. entwickelten Abstützkonstruktion findet sich in der Oktober-Nummer des Bulletin Oerlikon von 1923.

Bei Turbogeneratoren sind bekanntlich die an das Auftreten des Statorstromes gebundenen Verluste sehr verschieden von ohmschen Verlusten in der Statorwicklung. Es treten in jedem Falle noch erhebliche Zusatzverluste auf, welche oft die rein ohmschen Verluste um ein mehrfaches übersteigen, so dass der gesamte Energieverlust, der durch Belastungsstrom erzeugt wird, oft den vier- bis fünffachen Wert des rein ohmschen Verlustes ausmacht. Diese Zusatzverluste haben in verschiedenen Teilen der Maschine ihren Sitz. Die einen haben ihren Sitz im Wicklungskupfer selber, namentlich im Nutenkupfer, und sind der Rechnung leicht zugänglich. Doch ist deren Reduktion auf ein noch zulässiges Mass bei grossen Einheiten mit tiefen Nuten und einem Stromvolumen von 3000—4000 Ampereleitern pro Nut oft keine ganz leichte Sache, besonders bei Ausführung der Wicklung in Halbspulen und es muss zur Verwendung von Litzenleitern Zuflucht genommen werden. Auch bei den Generatoren für „City of London" sind die näher der Nutenöffnung gelegenen Leiter der Spulen als Litzen ausgeführt. Der Verlustkoeffizient erreicht denn auch für diese Maschinen den kritischen Wert von 1,33 noch lange nicht, auch nicht für das Nutenkupfer allein.

Ein anderer, weit grösserer Teil der Zusatzverluste hat seinen Sitz in der Dämpferwicklung des Rotors, besonders in den Kontaktstellen zwischen den als Dämpferstäbe wirkenden Nutenschlusskeilen und den als Kurzschlussringe wirkenden Rotorkappen. Die Konstruktion dieser Kontaktstellen, die neben der Forderung guten Kontaktes auch die Möglichkeit axialer Verschiebungen, welche durch verschiedene Wärmeausdehnung von Wicklung und Rotorkörper bedingt sind, enthalten muss, ist in Fig. 7 dargestellt. Um einen guten Kontakt zwischen den Nutenschlusskeilen und den Wicklungskappen zu erreichen, ist hier ein Ring aus gutleitendem weicherem Material, z. B. Kupfer,

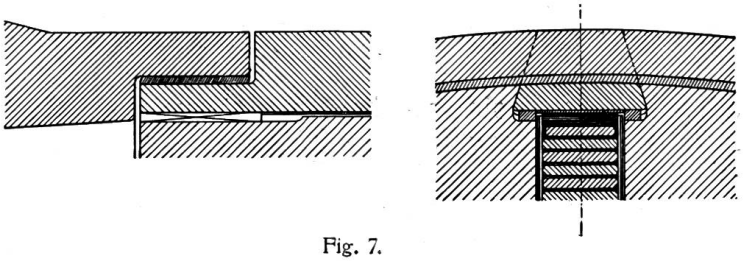

Fig. 7.

eingelegt, der durch die Schrumpfungspressung der Kappen gegen die darunterliegenden Enden der Nutenkeile gedrückt wird. Um ein allfälliges Nachgeben der Keilenden mit Sicherheit zu vermeiden, werden dieselben durch Einschlagen kleiner Stahlprismen zwischen dieselben und die Schultern der Wicklungsnuten dauernd nach aussen gegen den erwähnten Ring gedrückt.

Der weitaus grösste Teil der Zusatzverluste hat jedoch seinen Sitz in Konstruktionsteilen des Stators, wie Gehäuse, Pressplatten, Verschalung und Abstützkonstruktionen. Eine Berechnung dieser Verluste ist ausgeschlossen. Es lassen sich jedoch Massnahmen treffen, um dieselben in erträglichen Grenzen zu halten, da der ungefähre Verlauf und die Stärke der sie erzeugenden Wechselfelder immerhin bekannt sind. Für die „City of London"-Generatoren verteilen sich die Kurzschlussverluste bei einem Strom von 817 A (entsprechend 15600 kVA) wie folgt:

| | |
|---|---|
| Ohmsche Verluste in der Statorwicklung . . . . . | 38 kW |
| Zusatzverluste im Wicklungskupfer . . . . . | 3 „ |
| Zusatzverluste in der Dämpferwicklung und im Rotor . | 23 „ |
| Zusatzverluste in Konstruktionsteilen des Stators . . | 58 „ |
| Totale Kurzschlussverluste | 122 kW |

Die totalen Kurzschlussverluste erreichen also hier nur den 3,2fachen Wert der rein ohmschen Verluste, was ein sehr günstiges Verhältnis ist. Wir kommen damit zu den *Versuchsergebnissen* dieser Generatoren. In Fig. 8 sind Leerlauf- und Kurzschlusscharakteristik der betreffenden Maschinen wiedergegeben, ebenso sind darin die Erregungen für verschiedene Belastungszustände eingetragen. Ferner findet sich darin die Kurve für die Rotorerwärmung; wie man sieht, erreicht dieselbe bei voller Belastung mit 15600 kVA und cos $\varphi$ 0,8 nicht einmal 55° C; die dabei für die Erregung aufgewendete Energie im Rotor betrug 60 kW.

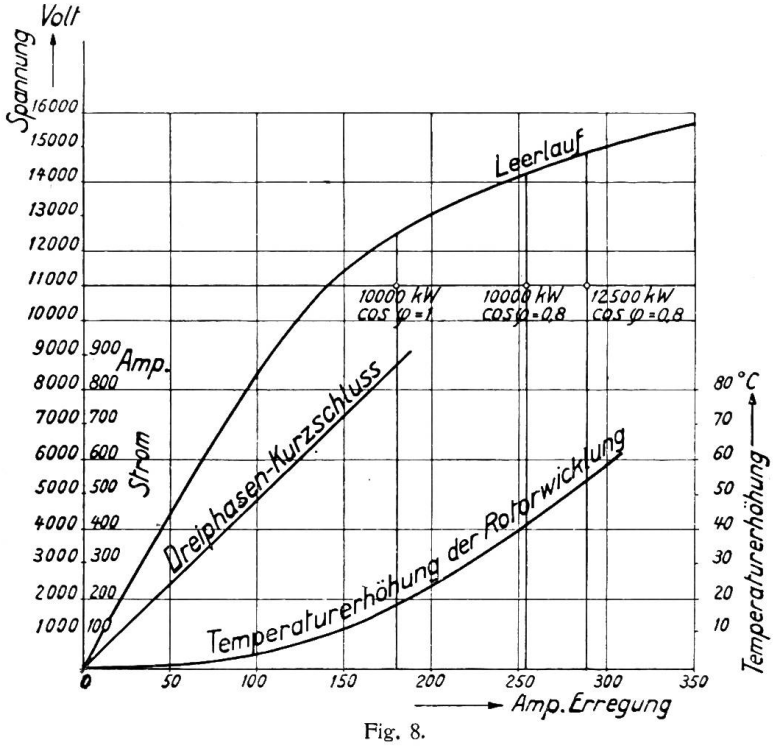

Fig. 8.

*Die Bestimmung der* in den Maschinen entstehenden *Verluste* geschah durch Messung der Menge und der Erwärmung der verwendeten Kühlluft. Diese Methode eignet sich am besten für grosse Einheiten, indem sie gleichzeitig mit den Erwärmungsdauerversuchen im Leerlauf und Kurzschluss ausgeführt werden kann, während Messungen durch elektrischen Antrieb infolge der grossen Massenträgheit oder Auslaufsmethode hier oft schwierig durchzuführen sind. Bedingungen zur Erreichung zuverlässiger Resultate sind: Konstanz der Erwärmung und möglichst genaue Bestimmung von Luftmenge und Lufterwärmung. Erstere Bedingung ist erfüllt durch Anwendung der Methode im Anschluss an die erwähnten Dauerversuche. Die Luftmessung geschieht mittels geeichten Anemometern über einer Verlängerung des oberen Luftaustrittskamins, welche durch gespannte Drähte in zahlreiche gleiche Felder eingeteilt ist

und die im Innern Führungswände besitzt, um einen gut parallel gerichteten Luftstrom am Austritte zu erhalten. Die Verwendung der sonst sehr geschätzten Düse zur Luftmessung verbietet sich wegen der zu geringen zur Verfügung stehenden Druckhöhe des Luftstromes. Die Verwendung des Prantl-Apparates zur direkten Messung der Geschwindigkeitshöhe am Austritt führt kaum zu genaueren Resultaten als die Anemometermessung wegen der Kleinheit der zu messenden Druckhöhe von höchstens 8—10 mm Wassersäule, zudem ist diese Methode viel umständlicher, weil die Ablesungen in jedem Felde über den ganzen Querschnitt vorgenommen werden müssen, mit jeweiliger Einstellung des Apparates in die genaue Richtung des Luftstromes, was nur durch Ausprobieren geschehen kann, während der Anemometer jeweilen nur am Anfang und am Schluss der Messung abgelesen werden muss und im übrigen nur in gleichen Zeitintervallen über die einzelnen Felder des Austrittskamins gehalten wird. Die Fehler, die mit Anemometer gemacht werden, können bei exakter Ausführung der Messung leicht unter 3 % gehalten werden.

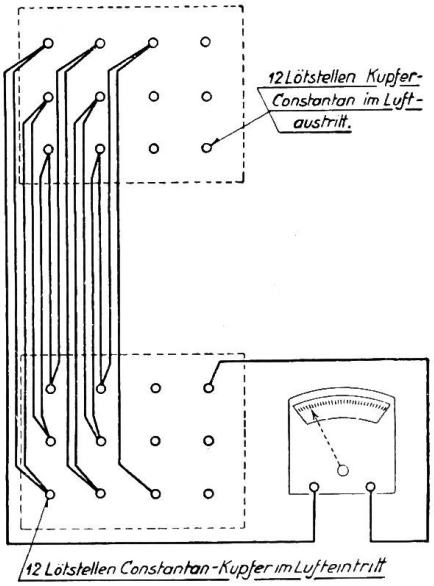

Fig. 9.

Die grösste Schwierigkeit bietet die Ermittlung der genauen Temperaturdifferenz zwischen eintretender und austretender Kühlluft, da die Temperaturverteilung über die Querschnitte, namentlich beim Austritt, nicht gleichmässig sind. Messungen der Temperatur mit Thermometern sind sehr umständlich und zeitraubend, weil eben entsprechend der Einteilung des Austrittsquerschnittes zahlreiche Einzeltemperaturen bestimmt werden müssen. Viel einfacher gestalten sich die Messungen bei Anwendung von Thermoelementen. Hierzu werden entsprechend dem Schema in Fig. 9 eine grössere Anzahl gleichmässig verteilter Thermoelemente im Eintrittsquerschnitt und Austrittsquerschnitt der Luft in Serie geschaltet. Das Instrument zeigt dann die Summe aller Temperaturdifferenzen zwischen Lufteintritt und Luftaustritt an, und um den Mittelwert zu erhalten, ist die Ablesung durch die Anzahl Lötstellen pro Luftquerschnitt zu dividieren. Man erhält so einen grossen, gut ablesbaren Ausschlag am Instrument und gleichzeitig in einer einzigen Ablesung gleich die richtige mittlere Temperaturdifferenz. Selbstverständlich müssen sämtliche in Serie geschalteten Thermoelemente samt ihren Verbindungsleitungen und Ableitungen zum Instrument genau geeicht werden, da man wegen der erheblichen Länge der Zwischenverbindungen nicht mit derabsolut richtigen Anzeige durch das Instrument rechnen kann. Ein weiterer Vorteil dieser Methode besteht darin, dass man leicht feststellen kann, ob die Konstanz der Temperaturdifferenz erreicht ist.

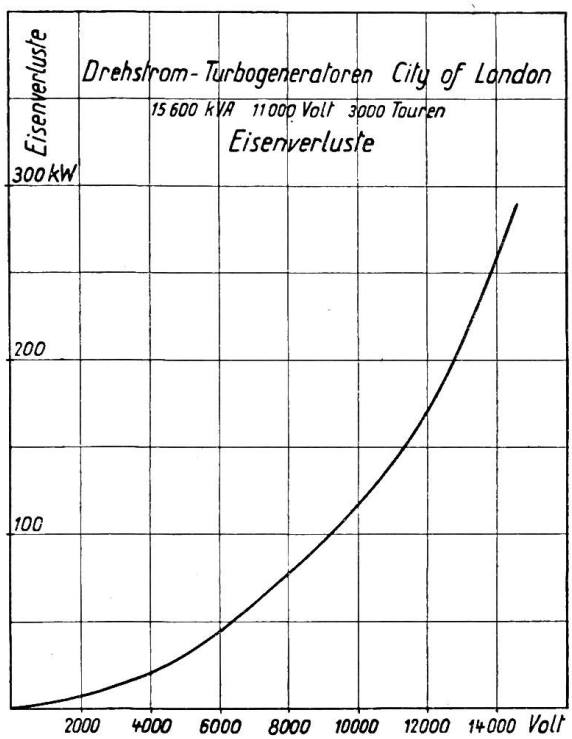

Fig. 10.

In Kurventafel Fig. 10 sind die so ermittelten Eisenverluste aufgetragen in Abhängigkeit der induzierten Klemmenspannung. Ueber die Grösse der totalen Kurzschlussverluste haben wir weiter oben schon berichtet; der Verlauf der Verluste in Abhängigkeit von dem Belastungsstrom gibt eine quadratische Kurve, da nicht nur die ohmschen Verluste, sondern auch die Zusatzverluste quadratischer Funktion sind. Die Ventilationsverluste betragen konstant 230 kW bei 19 $m^3$/sec Kühlluft. Dieser Betrag erscheint etwas hoch; tatsächlich könnte er nicht unwesentlich reduziert werden durch Herabsetzen der Kühlluftmenge auf ca. 15 $m^3$/sec, was, wie wir weiter unten sehen werden, noch eine durchaus zulässige Lufterwärmung gäbe und auch wegen der Erwärmung der einzelnen Teile der Generatoren ausführbar wäre. Die grosse Kühlluftmenge bedeutet immerhin für die Generatoren eine wertvolle Reserve für grössere Ueberlastungen längerer Dauer. Die Lagerreibung wurde bestimmt durch Messung der Menge und der Erwärmung des zugeführten Kühlöles. Bei eingelaufenen Lagern wurden die Reibungsverluste pro Lager zu 30 kW gefunden. Da die Generatoren für reine Nebenschlussregulierung im Magnetstromkreis der Erreger vorgesehen sind, fallen die Verluste in Regulierwiderständen des Rotorstromkreises fort, und es sind zu den reinen Erregungsverlusten nur noch die relativ kleinen Verluste im Erreger selbst hinzuzuzählen. In Fig. 11 sind sämtliche Verluste und die sich daraus ergebenden Wirkungsgrade für $\cos \varphi = 1$ und $\cos \varphi = 0{,}8$ aufgetragen.

An Generator II wurden ferner sehr eingehende Temperaturmessungen vorgenommen, welche mit grosser Sicherheit auf die im Betriebe auftretenden Uebertemperaturen schliessen lassen. Was die Rotorübertemperatur betrifft, so haben wir schon weiter oben angegeben, dass dieselbe bei Vollast Erregung im Leerlauf 55° C kaum erreicht hat. Im Leerlauf wurden bei verschiedenen Spannungen an zahlreichen Stellen der Statorzacken mittels Thermoelementen Temperaturmessungen vorgenommen, die nur wenig von einander abweichen und bei 12000 Volt induzierter Spannung eine Uebertemperatur von nur 29° C ergaben. Die bei dieser Spannung, die noch etwas höher liegt als die bei Vollast induzierte EMK, in den Zacken auftretenden Verluste waren ca. 32 kW. Bei Belastung mit 15600 kVA haben die Zacken noch einen grossen Teil der im Nutenkupfer auftretenden Verluste aufzunehmen. Dieser Betrag ist ca. 14 kW, so dass sich die Statorzacken im Betriebe mit Vollast max. um

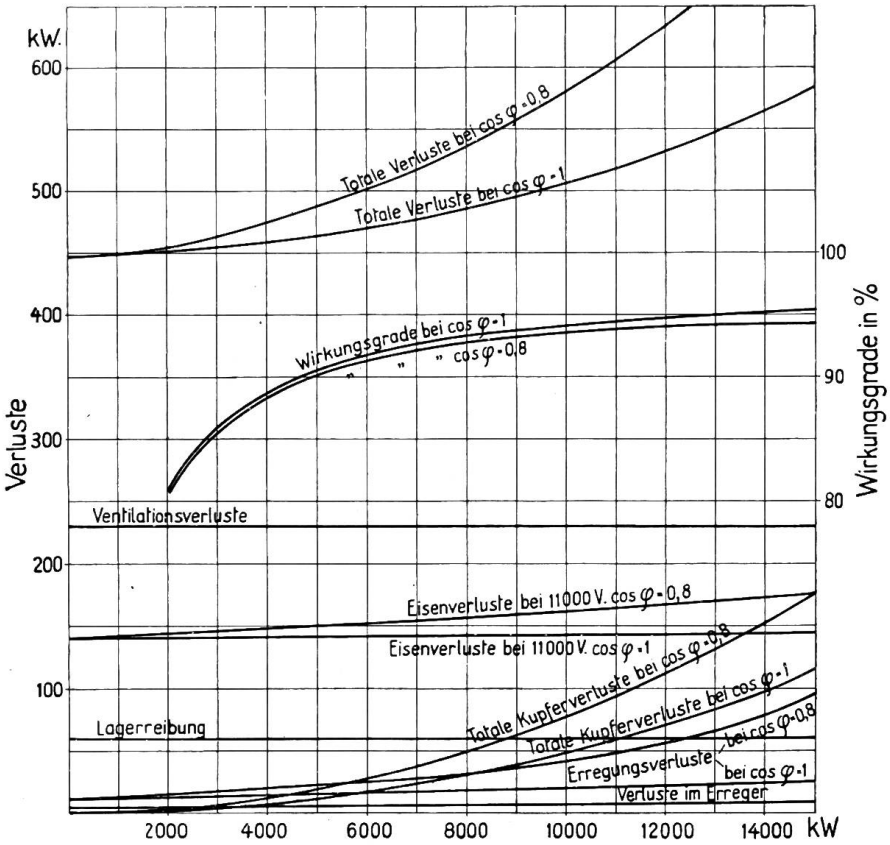


Fig. 11.

42° C gegenüber der Kühlluft erwärmen. Die Erwärmung des Nutenkupfers gegenüber den Zacken ergab im vorliegenden Falle 28° C, so dass die maximale Kupfererwärmung in der Mitte des Nutenkupfers 70° C erreicht. Da die ganze Spulenisolation innerhalb der Nut nur aus Mikanit besteht, ist diese Erwärmung ohne weiteres noch zulässig und entspricht auch den Vertragsbestimmungen, welche die Erwärmung nach den Normen der British Eng. Standards Association festsetzte. Von den bei Vollast 12500 kW bei cos $\varphi = 0{,}8$ auftretenden totalen Verlusten von 650 kW kommen für die Lufterwärmung nicht in Betracht 8 kW für Verluste im Erreger und 60 kW für Lagerreibungsverluste, so dass noch 582 kW übrig bleiben, welche durch die Kühlluft abgeführt werden müssen. Daraus resultiert bei 19 $m^3$/sec Kühlluft eine Erwärmung derselben um 27° C, was noch ein recht mässiger Wert ist.

Die drei Generatoren für die „City of London Electric Ligthing Co." sind also trotz der für ihre Entstehungszeit ausserordentlich hohen Leistung für solche Tourenzahlen in allen ihren Verhältnissen als durchaus harmonische Maschinen zu bezeichnen. Seit dieser Zeit sind dann allerdings Leistungen von 3000 tourigen Turbogruppen von 10—12000 kW als etwas durchaus Normales anzusehen, und schon trifft man Leistungen an von 20—25000 kW bei der gleichen Tourenzahl, und selbst solche über 30000 kW scheinen durchaus im Bereich des Möglichen zu liegen. Die Entwicklung steht also auch hier nicht still, trotzdem man zeitweilig an der Grenze des Möglichen angelangt zu sein glaubte.

---

# Ueber die Bestimmung des Aequivalentes der elektrisch erzeugten Wärme im Vergleich zu der durch Kohle erzeugten Wärme.

Vortrag des Herrn Ing. *F. Rutgers,* Oerlikon, an der Generalversammlung des Verbandes Schweiz. Elektrizitätswerke, am 21. Juni 1924 in Sitten.

*Der Vortragende weist auf die vielen Schwierigkeiten in der Bestimmung des Aequivalentes der durch Elektrizität bezw. durch Brennstoffe erzeugten Wärme hin und zeigt an einer grossen Anzahl von Beispielen, wie solche Aequivalenzzahlen erhalten werden können. Aus diesen Beispielen ist ersichtlich, innert welch weiten Grenzen die Aequivalenzzahlen variieren können.*

*L'auteur montre les difficultés que l'on rencontre si on veut comparer la valeur de l'énergie électrique appliquée au chauffage à la valeur des combustibles. Il donne un grand nombre d'exemples pour démontrer que la valeur relative du kWh varie entre des limites très éloignées.*

## I. Einleitung.

An der völlig unparteiischen Bestimmung des Aequivalentes zwischen Kohle und elektrischer Wärme sind alle Beteiligten: Stromlieferant, Stromkonsument und Lieferant der Wärmeanlage, in gleichem Masse interessiert, denn eine gedeihliche Entwicklung der elektrischen Wärme-Wirtschaft ist nur durch gerechten Ausgleich aller Interessen möglich, und durch sorgfältige Auswahl der zu elektrifizierenden Wärmeanlagen im Sinne grösster Wirtschaftlichkeit.

Das für die Wirtschaftlichkeit massgebende Betriebskosten-Aequivalent zwischen elektrischer Wärme und Kohle ist für verschiedene Wärmeanwendungen sehr stark verschieden, und kann Werte etwa zwischen 1 und 7 annehmen. Es lassen sich *keine allgemein gültigen Angaben* machen darüber, wieviele kWh erforderlich sind, um 1 kg Kohle zu ersetzen. Eine grosse Rolle spielt der *Wirkungsgrad* der Gesamtanlage von der Wärmequelle an (Kohle oder Elektrizität) bis zum Wärmeverbrauchsort, und ausserdem die *Benützungsdauer.*

Ein mit Kohlen gefeuerter Zimmerofen hat manchmal nur etwa 10 % Wirkungsgrad. Wird eine kleine Dampfmenge nur einige Stunden pro Tag benötigt, so ist der Wirkungsgrad des Dampfkessels infolge der langen Betriebspausen vielleicht