Zeitschrift: Bulletin de l'Association suisse des électriciens
Herausgeber: Association suisse des électriciens
Band: 27 (1936)
Heft: 10

Artikel: Materialausnützung und Wirkungsgrad elektrischer Maschinen
Autor: Rikli, H.
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-1057500

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: 23.08.2025

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

ASSOCIATION SUISSE DES ÉLECTRICIENS

BULLETIN

RÉDACTION:
Secrétariat général de l'Association Suisse des Electriciens et de l'Union des Centrales Suisses d'électricité, Zurich 8

EDITEUR ET ADMINISTRATION:
S. A. Fachschriften-Verlag & Buchdruckerei, Zurich 4
Stauffacherquai 36/40

Reproduction interdite sans l'assentiment de la rédaction et sans indication des sources

XXVIIe Année | N° 10 | Vendredi, 15 Mai 1936

Materialausnützung und Wirkungsgrad elektrischer Maschinen.

Von *H. Rikli*, Zürich.

621.3.017 8 : 621.313

Nachdem der Autor das Erwärmungsproblem und den Einfluss des Wirkungsgrades auf die Betriebskosten besonders von Turbogeneratoren gestreift hat, behandelt er den Einfluss der Dimensionen und damit der Materialausnützung auf den Wirkungsgrad und zeigt, wie das Problem der Materialausnützung in erster Linie ein Problem der Rotorkonstruktion (Turbomaschinen) ist. Hierauf werden einige moderne Turborotorkonstruktionen besprochen und verglichen.

Après avoir effleuré le problème de l'échauffement et de l'influence du rendement sur les frais d'exploitation en particulier des turbogénérateurs, l'auteur examine l'influence des dimensions et, partant, de l'utilisation des matériaux sur le rendement, et démontre que ce dernier problème touche en premier chef la construction des rotors. Pour terminer, l'auteur décrit et compare entre elles quelques exécutions modernes de rotors pour turbogénérateurs.

Die Frage der Materialausnützung in elektrischen Maschinen ist in erster Linie eine Erwärmungsfrage. Für die Erwärmung elektrischer Maschinen bestehen in den einzelnen Ländern schon seit vielen Jahren Normen. Auch die Regeln für elektrische Maschinen der Commission Electrotechnique Internationale, denen die SREM (Regeln des SEV) ensprechen, enthalten Bestimmungen über die Erwärmung. Diese Normen erfuhren für einzelne Maschinenkategorien mit der Zeit eine gewisse Aenderung, indem für diese, sofern die Isolation aus Mikanit oder Asbest besteht, höhere Erwärmungen zugelassen wurden als für sogenannte normale Maschinen. So sind bei Turbogeneratoren im Rotor heute allgemein auch nach den SREM Erwärmungen bis 90° C zulässig, und da diese Erwärmung aus der Widerstandszunahme errechnet wird, so werden die lokalen maximalen Erwärmungen z. T. noch erheblich höher liegen. Diese Abweichung von der sonst geltenden Regel (75 bis 80° C aus Widerstandszunahme) hat wohl ihren Grund in der äusserst gedrängten Bauart der Rotoren von Turbogeneratoren, welche eine Kühlung sehr erschwert. Auch für die Statorwicklung dieser Kategorie werden hie und da höhere Erwärmungen zugelassen als bei andern Synchronmaschinen, obschon hier kaum ein zwingender Grund vorhanden ist.

Dass übrigens auch diese maximal zulässigen Erwärmungsspitzen noch lange nicht die praktische Grenze bilden, über die hinaus eine wirkliche Gefährdung durch Zerstörung der Isolation zu befürchten ist, bewiesen z. B. schon längst die alten Maschinen der Niagara-Falls-Station, welche nach Angaben von Newbury [1]) folgende Temperaturen während der angegebenen Zeiten ausgehalten haben, ohne sichtbaren Schaden zu nehmen: Bis 145° C während 40 000 Betriebsstunden, 145 bis 175° C während 14 000 Stunden, 175 bis 210° C während 8000 Stunden, 210 bis 245° C während 2600 Stunden und 245 bis 285° C noch während 100 Stunden.

Mit zunehmender Erwärmung treten aber noch andere Beanspruchungen auf als nur direkter Wärmeeinfluss auf die Isolationsmaterialien. Durch Ausdehnung der Wicklung bei der Erwärmung und wieder erfolgende Kontraktion bei der Abkühlung in den Betriebspausen oder bei reduzierter Belastung entstehen unter Umständen unliebsame Erscheinungen, die sich nicht nur in einer mit der Zeit fortschreitenden Zermürbung der Isolation, sondern sogar in Deformationen der Wicklungen selbst bemerkbar machen können, und es ist dann Sache der Konstruktion, das Mass der Ausdehnung in Rechnung zu stellen.

Diese Erscheinung soll hier aber nicht weiter verfolgt werden, sondern eine andere Folge der Erwärmung, bzw. der sie bedingenden Materialbeanspruchungen: ihr Einfluss auf den Wirkungsgrad.

Bei zunehmender Belastung steigt, besonders bei schnellaufenden Maschinen, der Wirkungsgrad zuerst, um von einer gewissen Belastung an wieder langsam zu sinken. Dieser Verlauf der Wirkungsgradkurven (Fig. 1) ist allgemein bekannt.

Aber auch diese direkte Abhängigkeit von der jeweiligen Belastung soll hier nicht weiter interessieren. Es soll vielmehr untersucht werden, wie der Wirkungsgrad sich ändert, wenn bei gegebener Leistung und bei gleicher Erwärmung durch kon-

[1]) Trans. Amer. Inst. Electr. Engr. 1916, S. 1489.

struktive Massnahmen die Dimensionen wesentlich reduziert werden können.

Gerade in der Schweiz, einem der an Rohstoffen ärmsten Länder, besteht ein besonderes Interesse, die Material sparenden, zweckmässigsten Konstruktionen zu verwenden, um mit der ausländischen Konkurrenz Schritt halten zu können. Nun wird allerdings der Wirkungsgrad einer elektrischen Maschine nur in wenigen Fällen bei Konkurrenzangeboten eine direkte Rolle spielen, und, wenn

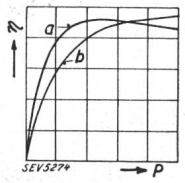

Fig. 1.
Wirkungsgrad in Funktion der Belastung:
a bei Langsamläufern,
b bei Schnelläufern.

auch beurteilt, bei kleineren Differenzen kaum ausschlaggebend sein. Eine Maschinengattung wird hier freilich eine Ausnahme machen: die Turbogeneratoren. Bei Turboaggregaten nämlich, bei denen ja der Dampfkonsum in weitaus den meisten Fällen *die* ausschlaggebende Rolle spielt, wird auch der Wirkungsgrad der betreffenden Generatoren dem gleichen Kriterium unterworfen sein. Das heisst, sowohl Dampfkonsumzahlen der Turbine, als auch Generatorwirkungsgrad werden bei Beurteilung von Konkurrenzeingaben kapitalisiert und erscheinen dann in einem ganz anderen direkten Verhältnis zum Maschinenpreis.

Bei x % Wirkungsgraddifferenz betragen die jährlichen Ersparnisse, bzw. Mehraufwendungen:

$$\frac{x \cdot D \cdot P \cdot Z \cdot K}{V \cdot 1000}$$

Hierin bedeutet: D den spezifischen Dampfkonsum pro kWh.
P die mittlere Leistung der Gruppe in kW.
Z die Zahl Betriebsstunden pro Jahr.
K den Preis der Kohle pro Tonne.
V die Verdampfungsziffer der Kesselanlage.

Je nach Verzinsung und Abschreibung wird der kapitalisierte Betrag 10- bis 12mal so hoch sein. Das heisst, die Mehraufwendung für eine Gruppe höheren Wirkungsgrades dürften 10- bis 12mal grösser sein als die jährlichen Ersparnisse ausmachen, ohne dass eine solche Gruppe preislich im Nachteil wäre. Eine Nachrechnung ergibt, dass schon bei nur 1 % Differenz im Dampfkonsum oder Wirkungsgrad ganz erhebliche Kapitalbeträge herauskommen, um welche eine solche Gruppe teurer sein darf. Umgekehrt heisst das also, dass zu untersuchen wäre, ob und wie weit mit besserer Materialausnützung (billigere Maschinen) eine ins Gewicht fallende Wirkungsgradverschlechterung eintritt.

Es soll nun untersucht werden, wie sich der Wirkungsgrad einer in allen Teilen höchst ausgenützten Maschine ändert, wenn durch gleichmässige Vergrösserung der linearen Dimensionen die Maschine entsprechend grösser und schwerer gebaut wird.

Zunächst wird sicher eine Steigerung der Ventilationsverluste eintreten, auch wenn die nötige Kühlluftmenge gar nicht zunimmt, denn die Luftreibungsarbeit eines Zylinders steigt mit der dritten Potenz der Umfangsgeschwindigkeit und linear mit der Oberfläche, also steigt die totale Luftreibungsarbeit mit der fünften Potenz der linearen Dimensionen. Da aber diese reine Luftreibungsarbeit des Rotors bei 3000tourigen Turbogeneratoren von einigermassen grösserer Leistung stets einen erheblichen Teil der gesamten Ventilationsverluste ausmacht, werden diese sicher auch steigen, selbst wenn es gelingen sollte, die Leistung der Ventilatoren zufolge vielleicht kleineren Druckes etwas zu vermindern.

Auch die Lagerreibung wird grösser ausfallen, und zwar steigt diese mit der dritten Potenz der linearen Lagerabmessungen.

Die Magnetisierungsverluste erfahren eine Verminderung proportional der linearen Vergrösserung, weil die Verluste pro Volumeneinheit etwa mit der vierten Potenz der linearen Vergrösserung abnehmen, und das Gesamtvolumen mit der dritten Potenz zunimmt.

Die Stromwärmeverluste im Stator (Kurzschlussverluste) zerfallen in Ohmsche Verluste in der Statorwicklung, denen zweckmässig noch die Zusatzverluste in der Wicklung selbst zugerechnet werden, und in sogenannte sekundäre Zusatzverluste in den Konstruktionsteilen, vor allem in den Stirnräumen und auf der Rotoroberfläche. Die Ohmschen Verluste werden linear mit dem Grad der Vergrösserung abnehmen, da die Längen proportional mit der Vergrösserung und die Querschnitte proportional mit deren Quadrat zunehmen. Anderseits werden aber die Zusatzverluste in der Wicklung mit der linearen Vergrösserung ebenfalls zunehmen, hauptsächlich wegen der Vergrösserung der Leiterdicken. Auch die sogenannten sekundären Zusatzverluste werden kaum eine Verkleinerung erfahren, da der Verkleinerung der linearen Strombelastung eine ebenso stark wirkende Vergrösserung der Oberflächen eintritt, welche der Sitz dieser Verluste sind. Im ganzen werden die Kurzschlussverluste von einer Aenderung der linearen Dimensionen kaum stark beeinflusst.

Die Erregungsverluste werden in erster Linie aus den gleichen Gründen wie die Ohmschen Verluste in der Statorwicklung linear mit der Vergrösserung abnehmen. Da jedoch die magnetischen Querschnitte im Rotor ungefähr gleich bleiben sollen (gleicher Flux), so wird für die Wicklung ein verhältnismässig grösserer Raum zur Verfügung stehen, so dass ihre Querschnitte mehr als proportional dem Quadrat der linearen Vergrösserung zunehmen können, wodurch eine mehr als lineare

Verkleinerung der Erregungsverluste möglich wird. Der Verlustposten für die Erregung ist jedoch an und für sich nicht gross, weshalb seine Veränderung nicht sehr ins Gewicht fällt.

Je nach der prozentualen Verteilung der einzelnen Verlustposten auf die Gesamtverluste werden mit einer Dimensionsveränderung Verlustzunahmen oder -abnahmen verbunden sein. Im allgemeinen werden aber diese Differenzen bei Vollast klein sein. Hingegen ist aus obigen Vergleichen ohne weiteres ersichtlich, dass bei Teillasten eine Dimensionsvergrösserung sicher eine zum Teil wesentliche Verschlechterung des Wirkungsgrades mit sich bringt, wegen des überragenden Einflusses, den hier dann die Ventilationsverluste und die Lagerreibung haben. Ja, dieser Einfluss wird bei grossen Einheiten von solcher Bedeutung sein, dass eine Dimensionsvergrösserung schon bei Vollast mit einer deutlichen Verschlechterung des Wirkungsgrades verbunden sein wird, da bei diesen mit ihren notgedrungen hohen Umfangsgeschwindigkeiten die Ventilationsverluste und namentlich die eigentlichen Luftreibungsverluste des Rotors immer mehr ins Gewicht fallen.

Es wird also auch vom Standpunkt der Wirkungsgradbeurteilung aus preislich von Vorteil sein, eine möglichst gedrängte Konstruktion mit höchster Materialausnützung anzustreben.

Es wird dabei allerdings nicht so verfahren werden können wie bei dieser Betrachtung angenommen wurde, dass einfach eine gleichmässige lineare Veränderung der Dimensionen vorgenommen wird, weil man hiebei bald auf Grenzen stossen würde, die einen Erfolg illusorisch machen. Vielmehr werden zweckmässig solche Veränderungen vorgenommen werden müssen, welche einer Weiterentwicklung praktisch keine Grenzen setzen. Für den grundsätzlichen Ueberblick über den Einfluss der Dimensionen auf den Wirkungsgrad war es nötig, von einer relativ einfachen Voraussetzung auszugehen, wenn auch deren Annahme von der Wirklichkeit erheblich abwich. Eine genaue Untersuchung bei Berücksichtigung der praktisch möglichen Veränderung ist wohl nur von Fall zu Fall an Hand von Beispielen durchführbar. Dabei bleiben aber die oben erwähnten Schlussfolgerungen über die verschiedenen Einflüsse doch bestehen.

Es sind eigentlich nur zwei Umstände, welche die Grösse einer elektrischen Maschine bestimmen: die Belastung des Eisens und die Belastung des Wicklungsmaterials (in der Hauptsache des Kupfers). Die elektrischen Eigenschaften des Kupfers haben sich seit Beginn der Entstehung elektrischer Maschinen kaum geändert. Die Leitfähigkeit des Kupfers ist seit Jahrzehnten praktisch immer gleich; auch beim Aluminium, das in neuerer Zeit mehr in Anwendung kommt, trifft das mehr oder weniger zu. Anders beim Eisen, besonders beim Dynamoblech. Da sind in den letzten Jahrzehnten und besonders in den allerletzten Jahren gewaltige Fortschritte gemacht worden, hauptsächlich was die Verkleinerung der Verlustziffer anbelangt, wo auch jetzt noch ständig Verbesserungen erzielt werden. Man sollte also meinen, dass in diesen Fortschritten der Weg zu suchen sei, auf welchem eine bessere Materialausnützung möglich ist. Sicher ist es dank der bedeutend besseren Blechsorten heute möglich, bis zu einem gewissen Grad besser ausgenützte, also kleinere und billigere elektrische Maschinen zu bauen als noch vor etwa 10 Jahren. Aber das hilft nicht über die Tatsache hinweg, dass in einem Punkte bei dem Dynamoblech in den letzten Jahren leider fast gar keine Verbesserung eingetreten ist und leider auch kaum eine Verbesserung zu erwarten ist, nämlich in der Magnetisierung. Leider hat das Eisen seinen Sättigungsgrad (ca. 20 000 Gauss), bis zu welchem die Magnetisierung mehr oder weniger steil ansteigt, jedoch sind die Unterschiede in den aufzuwendenden Amperewindungen für eine bestimmte Induktion namentlich bei höheren Sättigungen, von 15 000 bis 20 000 Gauss, nicht sehr gross. Der Vorteil der neuen niederwattigen Blechsorten liegt in der Verlustverminderung, was natürlich sehr wertvoll ist; eine bessere Ausnützung, also eine wesentliche Querschnittverminderung für einen bestimmten Kraftlinienfluss vermögen sie nicht zu bieten. Eine neue elektrolytisch hergestellte Blechsorte macht hievon scheinbar eine kleine Ausnahme, fällt aber wegen anderer Eigenschaften (nur in sehr dünnen Blechen herstellbar) praktisch kaum in Betracht. So bleibt also für eine bessere Materialausnützung kein anderer Weg offen, als das alte, in den letzten Jahrzehnten durch nichts verbesserte Kupfer mehr und mehr zu beanspruchen, um dadurch zu kleineren Dimensionen auch im Eisen zu kommen.

Man nähert sich also wieder dem ersten Fall der einfach grösser werdenden Belastung einer bestehenden Maschine, wo, wie man aus Erfahrung weiss, bei schnellaufenden Maschinen der Wirkungsgrad mit zunehmender Belastung bis weit hinauf ebenfalls zunimmt. Nur wird es jetzt der Kunst des Konstrukteurs vorbehalten bleiben, die Maschine so zu bauen und zu kühlen, dass nirgends die vorgeschriebenen Temperaturgrenzen überschritten werden.

Der Konstruktionsteil, an dem diese Forderungen am schwierigsten ausführbar sind, ist der Rotor einer elektrischen Maschine, besonders bei Turbogeneratoren, wo Flux und Erregerwicklung ohnehin auf engsten Raum zusammengedrängt sind. Im Stator wird es verhältnismässig leicht sein, eine wesentliche Leistungssteigerung zu erzielen, weil dort immer die Möglichkeit besteht, Vergrösserungen von gewissen Dimensionen vorzunehmen, ohne die Maschine erheblich teurer zu machen.

Die vermehrte Materialausnützung einer elektrischen Maschine wird also speziell bei Turbogeneratoren, denen unsere Betrachtungen ja in erster Linie gelten, immer ein Problem der Rotorkonstruktion bleiben.

Es gibt Konstruktionen von Turborotoren — ich denke da in erster Linie an englische Bei-

spiele —, bei denen die Rotorkühlung fast ausschliesslich von dessen Oberfläche her erfolgt. Dass dabei nur eine bescheidene Strombelastung pro cm Bohrungsumfang erreicht werden kann, liegt auf der Hand, denn die reine Mantelfläche eines Rotors ist im Verhältnis zu den Erregungsverlusten sehr klein, besonders bei grösseren Einheiten, weil ja die Erregungsverluste unter sonst gleichen Verhältnissen (d. h. elektrischen Beanspruchungen) mit der dritten Potenz der linearen Dimensionen zunehmen, die Oberfläche aber nur mit deren Quadrat. Eine solch reine Oberflächenkühlung wird also nur bei relativ kleinen Einheiten noch einigermassen wirtschaftlich sein können.

Die meisten Konstruktionen von Turbogeneratoren weisen denn auch für den Rotor eine mehr oder weniger wirksame Innenventilation auf, um die wirksame Kühlfläche zu vergrössern und die Wärme mehr am Ort ihrer Entstehung abführen zu können. Bekannt sind Konstruktionen, bei denen unterhalb der eigentlichen Wicklungsnuten noch

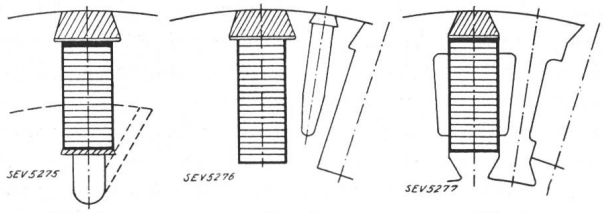

Fig. 2. Fig. 3. Fig. 4.
Rotorkonstruktionen.

Ventilationskanäle angeordnet sind, durch welche die Kühlluft mit relativ grosser Geschwindigkeit hindurchstreicht und meist in Maschinenmitte durch schräg in die Zähne gebohrte Löcher oder durch Umfangsnuten entweichen kann (Fig. 2). Die Verluste, die von einem Rotor solcher Konstruktion abgeführt werden können, sind, bezogen auf seine zylindrische Mantelfläche, ca. 7 kW/m². Auf dem europäischen Kontinent verwenden Brown, Boveri und Siemens-Schuckert diese Konstruktion.

Eine bedeutend intensivere innere Kühlung führte der Verfasser schon im Jahre 1910 in die Praxis ein. Sie ist schematisch in Fig. 3 dargestellt. Die inneren Kühlkanäle sind als tiefe radiale Nuten in die zwischen den Wicklungsnuten liegenden Rotorzacken eingefräst und aussen durch Keile verschlossen, die in der Maschinenmitte durch Oeffnungen die erwärmte Luft entweichen lassen. Die Konstruktion weist gegenüber derjenigen von Fig. 2 verschiedene Vorteile auf. Der Querschnitt der Kühlnuten kann grösser ausgeführt werden, und ihre Kühlfläche ist wegen deren schlanken Form ebenfalls wesentlich grösser. Weiter hat der Wärmefluss von der Wicklung bis zur Kühlfläche der Nut nur einen sehr kurzen Weg von grossem Querschnitt zurückzulegen. Diese Umstände bewirken, dass solche Rotoren mit einer Erregungsenergie von 10 bis 12 kW/m² zylindrischer Rotoroberfläche belastet werden können. Ferner wird die mechanische Beanspruchung der Rotorzacken durch den Wegfall von hauptsächlich im Zahnkopf gelegenem Material bedeutend reduziert, ohne dass die wichtigsten magnetischen Querschnitte eine Verengung erfahren. Diese günstigen Kühlverhältnisse ermöglichten schon 1916, für die Rotorwicklung grosser Turboeinheiten mit Umfangsgeschwindigkeiten von 140 m/s und mehr Aluminium einzuführen, was eine weitere, sehr wünschenswerte Reduktion der mechanischen Beanspruchungen im Rotor mit sich brachte und erst ermöglichte, grosse 3000tourige Einheiten von 70 000 bis 100 000 kVA mit relativ bescheidenen mechanischen Beanspruchungen auszuführen. Als erste Gross-Generatoren dieser Art wurden nach den Ideen des Verfassers die drei Turbogeneratoren der Zentrale St-Denis der Electricité de Paris durch Jeumont und Charleroi ausgeführt. Jeder dieser Generatoren hat eine Leistung von 72 000 kVA bei 3000 U/min.

Eine Konstruktion, welche ebenfalls recht gute Kühlverhältnisse aufweist, ist der Rotor der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft. Die Konstruktion ist im Prinzip in Fig. 4 dargestellt. Die Kühlluft bestreicht direkt die allerdings nach aussen isolierten, in Formen gebackenen Rotorspulen. Zur besseren Wirkung kann die Isolationsumpressung stellenweise ausgespart werden. Die Rotoren der drei oben genannten Generatoren in St-Denis weisen eine ähnliche Konstruktion auf. Die Belastbarkeit dieser Rotoren bei normaler Erwärmung scheint auch etwa bei 12 kW/m² zylindrischer Mantelfläche zu liegen.

Versuche, die der Verfasser in den letzten Jahren gemacht hat und bereits an zwei grossen Einheiten von 20 000 bis 30 000 kW erproben konnte, haben gezeigt, dass es möglich ist, die Verlustbelastung pro 1 m² Rotormantelfläche noch ganz bedeutend zu steigern. Die neue Kühlungsart, welche dies ermöglicht, ist eine Kombination der Innenkühlung nach den Fig. 2, 3 und 4, und lässt Werte von 20 kW/m² und mehr erreichen. Sie besteht im wesentlichen darin, dass die Kühlnut in die Wicklung selbst verlegt wird zwischen zwei an die isolierte Nutenwandung anliegenden, nach innen nackten Wicklungsschichten. Die Wärmeabgabe an das Rotoreisen erfolgt in gleichem Ausmass wie nach Fig. 3 und 4; dazu tritt aber noch eine wesentlich gesteigerte Wärmeabgabe direkt an die durchstreichende Kühlluft. Diese tritt axial in die erwähnten Kühlkanäle ein und durch entsprechende Löcher in den Verschlusskeilen in den Luftraum aus.

Alle die hochqualifizierten Konstruktionen mit innerer Rotorkühlung haben bis jetzt den Nachteil, dass bei zunehmender Rotorlänge, da die Kühlluft doch nur von beiden Seiten zugeführt wird, der Luftstrom durch den Rotor sich nach der Mitte zu immer mehr erwärmt und so bei gleicher Strombelastung die Maximaltemperatur des Rotors und somit auch dessen messbare mittlere Erwärmung heraufsetzt. Der Konstrukteur wird dadurch gezwungen, bei Leistungssteigerungen, die durch Verbreiterung einer Maschine erreicht werden sollen,

die Verbreiterung etwas grösser als der Leistungssteigerung entsprechend auszuführen und die Strombelastung etwas herabzusetzen. Um dem zu begegnen, wurde schon verschiedentlich versucht, dem Rotorinnern gegen die Maschinenmitte zu frische Kühlluft zuzuführen.

Bekannt ist in dieser Hinsicht eine Rotorkonstruktion der Allis-Chalmers Mfg. Co., die sie erstmals für einen Turbogenerator von 120 000 kVA bei 1800 U/min ausführte, dessen Rotor die respektable aktive Länge von 7,2 Meter aufwies. In die Zacken des Rotors sind in radialen Ebenen über 3000 Löcher gebohrt, welche im Grunde je paarweise miteinander kommunizieren. Durch besondere Formgebung der Eintrittsöffnungen wird durch diese an Stellen, wo vom Statoreisen her Frischluft in den Luftraum strömt, Luft geschöpft und durch die Austrittslöcher wieder dem Luftraum zugeführt, da wo von diesem die Luft wieder radial nach aussen strömt. Die auf diese Weise erzielte Kühlfläche im Rotoreisen und die für die Luft zur Verfügung stehenden Durchströmquerschnitte sind recht gross, und man glaubt es den Herstellern gerne, wenn sie sagen, dass die Versuche einen bedeutend grösseren Kühleffekt mit den Ventilationslöchern als ohne diese ergeben haben. Genauere Angaben über die Rotorerwärmung sind leider nicht mitgeteilt worden, aber es zeigt sich, dass der Rotor doch sehr schwach belastet ist und bei Vollast kaum über 6 kW/m² Verlustbelastung herauskommt, was mit den relativ grossen Dimensionen der Maschine, die zudem mit $\cos\varphi = 0{,}95$ arbeitet, auch übereinstimmt.

Nun wurden in den letzten Jahren von Franklin Punga und H. Roos Patente gelöst, welche in Verbindung mit einer Anordnung unterteilter Rotorspulen zwecks einfacherer mechanischer Herstellung der Wicklung ein ähnliches Prinzip der Frischluftschöpfung aus dem Luftraum für die Innenkühlung des Rotors aufweisen. Jedoch ist diese bedeutend wirksamer durchgeführt als bei der Konstruktion von Allis Chalmers, indem die so geschöpfte Frischluft ähnlich wie bei der erwähnten kombinierten Kühlmethode des Verfassers ohne Zwischenschaltung einer Isolationsschicht dem Wicklungsmaterial direkt in die Wärme entzieht. Diese Konstruktion bewirkt demnach den gleichen Kühleffekt wie die erwähnten Ausführungen des Verfassers, ist aber ganz unabhängig von der axialen Länge der Maschine. Die Luftschöpfung erfolgt durch verschiedene Formgebung der Ein- und Austrittsöffungen für die Kühlkanäle, welche in Wicklungsnuten selbst angeordnet sind, indem die Eintrittsöffnungen in den Verschlusskeilen als vorwärts gekrümmte Schaufeln im Sinne der Rotation, und die Austrittsöffnungen als rückwärts gekrümmte Schaufeln ausgebildet sind. Die Lufteintrittsstellen sind auch hier in Umfangszonen angeordnet, welche gegenüber den Frischlufteintritten der Statorrükkenluft gegenüberliegen. Zwischen beiden Zonen bestreicht die Kühlluft in axialer Richtung direkt die Wicklung. In Fig. 5 ist das Prinzip dieser Kühlmethode schematisch dargestellt.

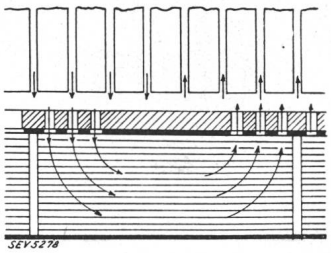

Fig. 5.
Kühlung nach Punga und Roos.

Diese bestmögliche Ausbildung der Rotorkühlung erlaubt, mit der Strombelastung pro cm Bohrungsumfang im Stator sehr hoch hinauf zu gehen und bei ganz normalem Verhältnis zwischen den Amperewindungen auf Stator und Rotor Werte bis 900 A/cm und selbst darüber zu erreichen. Dadurch, dass man das Verhältnis der Amperewindungen nicht ändert und die Leistungssteigerung nicht einfach durch eine proportionale Steigerung des Belastungsstromes erzielt, ist man gezwungen, in gleichem Verhältnis wie Belastung auch die Leerlauf-Amperewindungen für den Luftraum grösser werden zu lassen, d. h. diesen selber ebenso stark zu vergrössern, da eine Steigerung der Luftraminduktion aus weiter oben angegebenen Gründen leider nicht möglich ist. Dieser Umstand bewirkt aber, sehr zum Vorteil des Wirkungsgrades, eine nicht unbedeutende relative Abnahme der sekundären Zusatzverluste auf dem Rotor, wodurch das Streben nach bester Materialausnützung obendrein noch eine Belohnung erhält durch indirekte Verbilligung via Kapitalisierung der Verluste.

Elektrotechnische Notizen von einer Studienreise nach dem Osten der Vereinigten Staaten von Nordamerika.

Von *H. Wüger*, Kilchberg. 621.31(73)

(Fortsetzung von Seite 239.)

V. Messgeräte, Relais und Zähler.

Es würde zu weit führen, im Rahmen dieses Berichtes auf Details einzutreten. Meine Zeit reichte auch nicht, um einen zusammenhängenden Ueberblick über dieses Sondergebiet zu erhalten. So beschränke ich mich auf die Erwähnung einiger weniger Neuigkeiten.

Rein äusserlich sind Instrumente und Zähler weniger gefällig als unsere europäischen Konstruktionen. Das bedingt namentlich auch, dass Schalttafeln