

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band: 21 (1930)
Heft: 14

Artikel: Grosse Dreiphasen-Generatoren
Autor: Hunziker, E.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1061322>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 17.05.2025

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

SCHWEIZ. ELEKTROTECHNISCHER VEREIN

BULLETIN

ASSOCIATION SUISSE DES ÉLECTRICIENS

Generalsekretariat des
Schweiz. Elektrotechnischen Vereins und des
Verbandes Schweizerischer Elektrizitätswerke

REDAKTION
Zürich 8, Seefeldstr. 301

Secrétariat général de
l'Association Suisse des Electriciens et de
l'Union de Centrales Suisses d'électricité

Verlag und Administration

Fachschriften-Verlag & Buchdruckerei A.-G.
Zürich 4, Stauffacherquai 36/38

Editeur et Administration

Nachdruck von Text oder Figuren ist nur mit Zustimmung der
Redaktion und nur mit Quellenangabe gestattet

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

XXI. Jahrgang
XXI^e Année

Bulletin No. 14

Juli II
Juillet II 1930

Grosse Dreiphasen-Generatoren¹⁾.

Von Oberingenieur E. Hunziker, Baden.

621.313.322

Es wird auf das heutige Bedürfnis im Kraftwerkbau nach immer grösseren Einheiten von Turbogeneratoren und Generatoren für Wasserkraftanlagen hingewiesen und an Hand von bisher gebauten oder zurzeit in Ausführung begriffenen Grossgeneratoren gezeigt, wie diesem Bedürfnis Rechnung getragen werden kann und welche Perspektiven sich auf Grund der heutigen Erfahrungen für den Bau solcher Maschinen eröffnen. Dabei wird den mechanischen Problemen besondere Aufmerksamkeit geschenkt, die für die Entwicklung des Generatorenbaues von ausschlaggebender Bedeutung sind. Im weiteren werden die Faktoren erwähnt, durch welche dem Bau von Generatoren eine Grenze in ihrer Leistung gesteckt wird.

L'auteur attire l'attention sur le besoin que les centrales éprouvent actuellement d'installer de grosses unités, comme turbo-alternateurs et génératrices pour usines hydrauliques; en se basant sur les types réalisés jusqu'à présent et sur ceux en construction, il montre comment on peut satisfaire ce besoin et quelles perspectives s'ouvrent devant la construction de machines semblables. Le côté mécanique du problème, qui va prendre une importance prépondérante pour le développement de l'industrie des génératrices, fait l'objet d'un examen particulier. L'auteur mentionne enfin les facteurs qui mettront une limite à la puissance unitaire des machines.

Die Entwicklung der Elektrizitätsversorgung und des Kraftwerkbaues, sowie das Bestreben, dieselben bezüglich Erstellung und Betrieb möglichst sparsam zu gestalten, haben zu stets grösseren und leistungsfähigeren Einheiten geführt. Hand in Hand damit ging eine weitgehende Erhöhung der Drehzahlen und der Betriebsspannungen.

Dieser Gang der Entwicklung wird auch in Zukunft nicht zum Stillstand kommen, höchstens dass in dieser oder jener Hinsicht eine Verlangsamung des Tempos eintreten wird.

Der Kraftmaschinenbau (Dampfturbinen, Wasserturbinen) hat den Forderungen Rechnung getragen und durch Neukonstruktionen bedeutende Fortschritte erzielt. Der Generatorenbau hat sich den Forderungen nach gesteigerter Leistungsfähigkeit — der Not gehorchend — jeweils anzupassen verstanden und hat Maschinen erzeugt, die man noch vor wenigen Jahren für unausführbar gehalten hat; dabei ist der Generator in weitgehendem Masse zu einem mechanischen Problem geworden.

Es dürfte ein gewagtes Unterfangen sein, heute vorauszusagen, wo die Grenzen liegen und welche Grenzen als erreichbar zu bezeichnen sind. Es ist aber gut, dass wir uns darüber Rechenschaft geben, was auf Grund der heutigen Kenntnisse und Erfahrungen zunächst noch erreichbar erscheint; dazu wird am meisten beitragen, wenn wir uns einige Beispiele ausgeführter oder in Ausführung begriffener Generatoren, die zu den grössten bisher gebauten gehören, vergegenwärtigen und an

¹⁾ Wiedergabe eines Berichtes für die Weltkraftkonferenz Berlin 1930.

Hand derselben uns ein Bild über die weitere Entwicklungsmöglichkeit in konstruktiver Hinsicht zu machen versuchen.

A. Turbo-Generatoren.

1. 3000 U/m. Vermutlich die grössten in regelrechtem Betrieb befindlichen Generatoren dieser Drehzahl sind diejenigen des Kraftwerkes Laziska Gorne (Polen). Dieselben sind bemessen für 40 000 kVA bei $\cos \varphi = 0,7$, 10 500 V und 50 Per/s. Die Bauart und Hauptabmessungen gehen aus Fig. 1 und 2 hervor. Der Stator ist in der Umfangsrichtung einteilig; das Gehäuse aus Gusseisen ist in der Längsrichtung in drei Teile geteilt und die Füße sind angeschraubt; letzteres ermöglichte es, den fertig geblechten und gewickelten Stator zu befördern. In neueren Ausführungen wird das Gehäuse in geschweisster Eisenkonstruktion gebaut (Fig. 3),

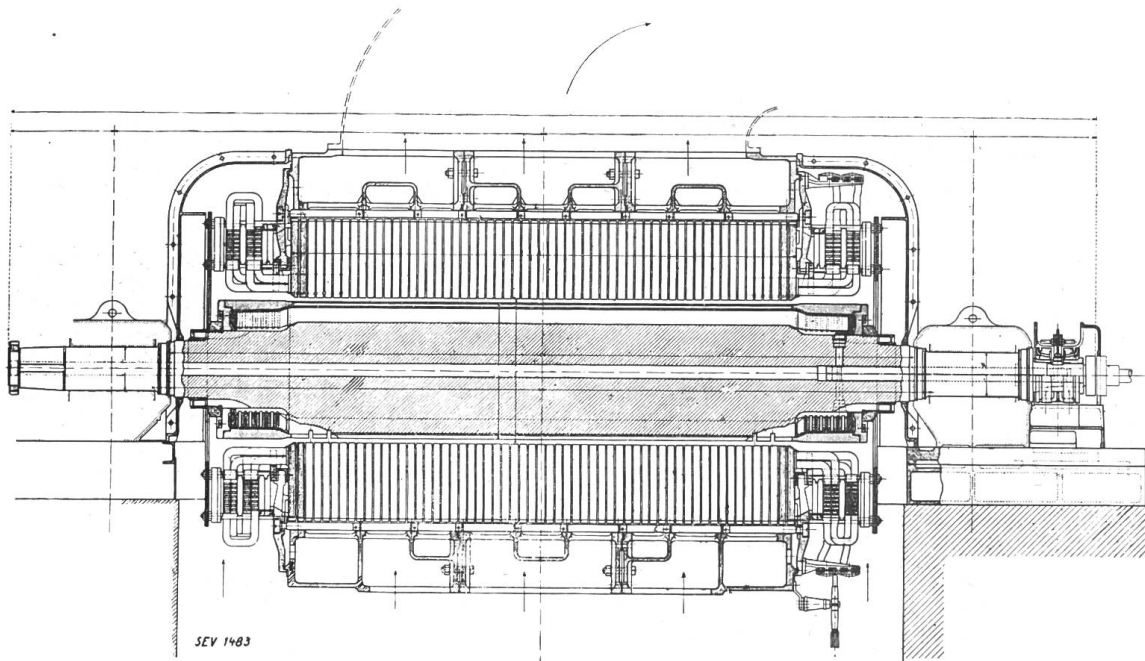


Fig. 1.
Dreiphasen-Generator 45 000 kVA, 3000 U/m für das Kraftwerk Laziska Gorne (Polen).
(Masstab ca. 1 : 60.)

wodurch eine nennenswerte Gewichtsverminderung erzielt wird. Der Blechkörper ist aus hochlegierten Blechen (Verlustziffer 1,7 W/kg) zusammengesetzt. Die Pressplatten aus Stahlguss sind am inneren Umfang mit tiefen, radialen Schlitten versehen und tragen Kämme aus Bronze als Abstützung der Statorblechzähne. Die Statorwicklung ist eine Stabwicklung mit zwei Stäben pro Nut und ist in Stern geschaltet mit zwei parallelen Stromkreisen und mit verkürztem Schritt. Die Wicklungsköpfe sind in üblicher Weise gegen die Pressplatten kurzschlussicher abgestützt, jedoch unter möglichster Vermeidung von Metall als Material für die Abstützungen. Die Wicklungsnuten sind halboffen, und zwar so, dass die dem Rotor zugekehrte verkleinerte Nutenöffnung eine gewisse radiale Höhe erhält; damit werden u. a. eine erhöhte Abkühlungsmöglichkeit der Statorzähne und ferner ein vergrößerter radialer Abstand zwischen Wicklungsköpfen und Rotorkappen erzielt. Die Statorverschaltungen sind aus Aluminiumguss in möglichst einfacher Form und mit reichlichem Abstand von den Wicklungsköpfen ausgeführt. Die Belüftung des Stators geschieht zum Teil durch den Luftspalt, von den beiden Enden her, grösstenteils aber radial; zu diesem Zwecke sind durch das Gehäuse vier Eintritts- und fünf Austrittskammern gebildet, so dass mehrere parallele Luftwege entstehen. Die Kühlluft tritt am äusseren Umfange des Blechkörpers ein, durchfliesst die Lüftungs-

schlitze in demselben radial nach innen, durchfliesst ein Stück weit den Luftspalt zwischen Stator und Rotor, um radial nach aussen durch andere Lüftungsschlitze im Blechkörper zu entweichen. Durch diese Belüftungsart wird eine gleichmässige Abkühlung des Blechkörpers erreicht, unabhängig von der axialen Länge desselben.

Der Rotor ist als ein einziges Schmiedestück hergestellt, aus dem die zur Unterbringung der Wicklung und zur Belüftung erforderlichen Längsnuten ausgefräst wurden; Eindrehungen in der Umfangsrichtung sind vermieden worden, um möglichst grosse Steifigkeit des Rotorkörpers zu erhalten; aus demselben Grunde sind die beiden Lager so nahe als möglich zusammengedrückt und die Schleifringe ausserhalb des Endlagers angeordnet. Die kritische Drehzahl wurde mit 1900–2000 berechnet, indessen konnte weder beim Schleuderversuch, noch im Betriebe eine kritische Drehzahl bemerkt werden. Die Rotorwicklungen sind mit hitzebeständigem Material isoliert und nach dem Einlegen in die Nuten unter gleichmässigem Wärmen

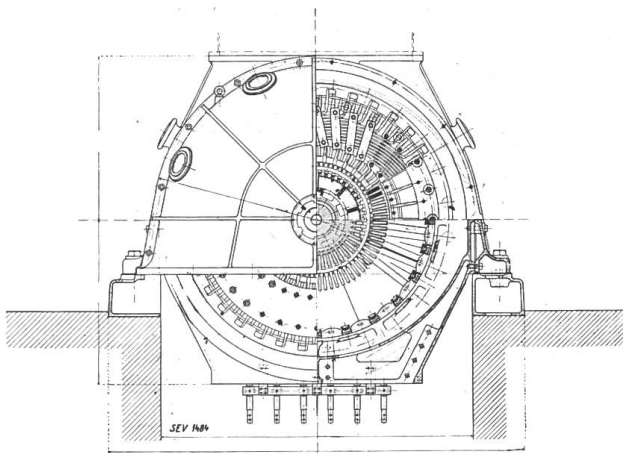


Fig. 2.
Dreiphasen-Generator 45000 kVA, 3000 U/m
für das Kraftwerk Laziska, Gorne (Polen).

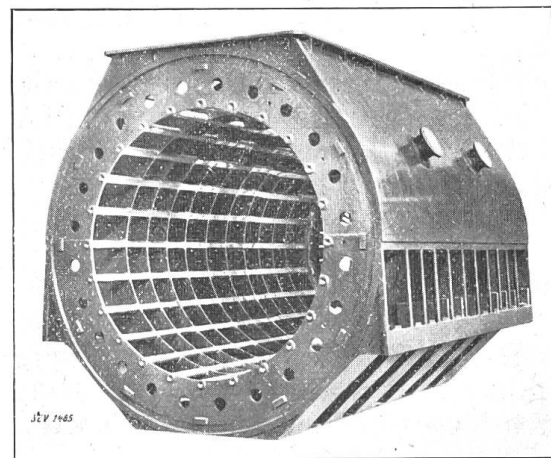


Fig. 3.
Geschweisstes Stahlgehäuse zu dem Dreiphasen-Generator
45000 kVA, 3000 U/m für das Kraftwerk Laziska, Gorne
(Polen). (Masstab ca. 1 : 80.)

festgepresst, so dass Lagenveränderungen im Betrieb praktisch ausgeschlossen sind. Die Wicklungsköpfe werden durch die Rotorkappen aus unmagnetischem Stahl gehalten; das hierfür verwendete Material hat eine Streckgrenze von ca. 70 kg/mm² und eine Zerreissfestigkeit von 90–95 kg/mm² bei 30–35 % Dehnung, die Höchstbeanspruchung der Kappenringe bei 3000 U/m beträgt ca. 25 kg/mm². Die Belüftung des Rotors geschieht in der Hauptsache an der Ballenoberfläche, da, wie bereits erwähnt, Lüftungskanäle im Rotorkörper nicht vorhanden sind, mit Ausnahme einiger kleiner Nuten, die an den beiden Enden eingefräst sind und zur Lüftung der Wicklungsköpfe unter den Rotorkappen dienen.

Der Rotorkörper besteht aus vergütetem Chromnickelstahl von 45 kg/mm² Streckgrenze, 65 kg/mm² Zerreissfestigkeit und 15–20 % Dehnung. Die höchste Beanspruchung tritt an der axialen Bohrung auf und beträgt bei der durch die R.E.M. festgesetzten Schleuderdrehzahl (125 % der Nenndrehzahl) ca. 60 % der Streckgrenze; die Beanspruchung in den Zähnen ist wesentlich geringer. Ohne Ausbohrung würde die Höchstbeanspruchung etwa nur die Hälfte betragen; die Bohrung bedeutet also eine wesentliche Schwächung des Körpers, kann aber nicht umgangen werden, da sie von den Stahlwerken gefordert wird, als die einzige Möglichkeit, das Innere des Stückes zu sehen und zu kontrollieren; ferner wird die Vergütung bedeutend wirksamer und die Gefahr, dass innere Härterisse entstehen, ist kleiner. Die erwähnte Höchstbeanspruchung ist als durchaus zulässig anzusehen, zumal im Betriebe die Schleuderdrehzahl kaum vorkommen dürfte, setzt aber bei der verbleibenden verhältnismässig geringen Marge voraus, dass der Körper fehlerfrei und möglichst frei von inneren Spannungen angeliefert werde.

Die Erwärmung der Maschine wurde gemessen zu 70°C im Rotor (Wi. Mssg.) und 60°C im Stator (eingebaute Messelemente). Der Generator könnte somit bei $\cos\varphi = 0,8$, d. h. bei unmerklich erhöhter Rotorerwärmung und bei Statorerwärmung innerhalb den REM-Grenzen mit 45000 kVA bei $\cos\varphi = 0,8$ belastet werden. Wir wollen im folgenden die Verluste zusammenstellen, bezogen auf 45000 kVA als Nennleistung und unter Benützung der gemessenen Einzelverluste:

Verluste bei 45000 kVA und	$\cos\varphi = 1$	$\cos\varphi = 0,8$
	kW	kW
Statoreisen	180	225
Statorkupfer	90	90
Rotorkupfer	55	85
Luftreibung des Rotors .	230	230
Zusatzverluste	180	180
Verluste im Generator .	<u>735 kW = 1,6 %</u>	<u>810 kW = 2,2 %.</u>

Dazu kommen noch die Lüftungsverluste, welche sich folgendermassen berechnen: die erforderliche Kühlluftmenge bei Annahme einer Temperaturzunahme der Luft um ca. 25°C beträgt ca. $28\text{ m}^3/\text{s}$ bei 20°C , entspr. ca. $30\text{ m}^3/\text{s}$ bei 65°C .

	mm/WS
Der Druckverlust beträgt im Generator	140
im Kühler und in den Luftkanälen	60
Total ca.	<u>200.</u>

Daraus berechnet sich der Energiebedarf des Lüfters unter Annahme eines Wirkungsgrades von $\sim 50\%$ zu $\sim 120\text{ kW}$; ferner beträgt die Lagerreibung in den beiden Generatorlagern 115 kW .

Die Gesamtverluste betragen somit bei $\cos\varphi =$. . .	1	0,8
	kW	kW
im Generator	735	810
im Lüfter	120	120
in den Lagern	115	115
total Verluste	<u>970 = 2,1 % ;</u>	<u>1045 = 2,8 % ,</u>
woraus Wirkungsgrad	<u>97,9 %</u>	<u>97,2 %.</u>

Die Belüftung des Generators erfolgt in der Weise, dass die Kühlluft im geschlossenen Kreislauf den Generator, den Lüfter und den Kühler durchfliesst; die im Lüfter zugesetzte Wärme wird also im Kühler absorbiert und dem Generator die nicht vorgewärmte Kühlluft zugeführt; das ist nicht der Fall, wenn der Lüfter, wie dies bei kleineren Generatoren üblich ist, im Generator selbst eingebaut wird (z. B. an beiden Enden des Rotors); in diesem Falle findet durch die Lüfterverluste eine Anwärmung der Luft um $6-7^{\circ}\text{C}$ statt und die erforderliche Luftmenge müsste in unserem Falle von 28 auf $37\text{ m}^3/\text{s}$ erhöht werden, gleiche Erwärmung der Luft vorausgesetzt. Der grösseren Luftmenge entsprechend steigt der Druckverlust im Generator ungefähr quadratisch mit der Luftmenge; den Druckverlust im Kühler und in den Kanal setzen wir gleich ein, in der Annahme, dass diese Teile der grösseren Luftmenge entsprechend bemessen werden. Der Druckverlust beträgt dann:

	mm WS
im Generator	245
im Kühler etc.	60
Zusammen	<u>305</u>

und die Lüfterverluste, bei einem Wirkungsgrade von ca. 35% , 315 kW . Für die Totalverluste des Generators ergibt sich dann bei:

	$\cos \varphi = 1$	0,8
	kW	kW
Verluste im Generator . . .	735	810
Verluste in den Lagern . . .	115	115
Verluste im Lüfter	305	305
	<u>1155</u>	<u>1230</u>
oder	2,5 %	3,3 %.

Es zeigt sich somit, dass bei Anordnung des Lüfters ausserhalb des Generators die Verluste bei $\cos \varphi = 0,8$ von 3,3 auf 2,8 %, d. h. um 0,5 % der Vollast vermindert werden; bei Halblast beträgt der Gewinn ca. 1,3 %, was schon recht bemerkenswert ist. In Wirklichkeit ist der Gewinn noch etwas grösser, weil die erhöhten Zusatzverluste in den weniger einfach gestalteten Verschaltungen nicht berücksichtigt sind.

Das Gewicht des Generators ohne Grundplatte, Lager und Erreger beträgt 110 t oder 2,5 kg/kVA.

Aus vorstehender Schilderung des 45 000 kVA-Generators ist zu erkennen, dass dem Bau noch grösserer 3000-touriger Generatoren nichts wesentliches im Wege steht, soweit Erwärmung, kritische Drehzahl und Belüftung in Betracht kommen; bei geringer Vergrösserung des Rotordurchmessers und entsprechend grösserer Eisenlänge scheint eine Leistung von 70 bis 75 000 kVA erreichbar. Turbogeneratoren grösserer Leistung sind entworfen worden (bis zu 100 000 kVA) unter Annahme eines grösseren Rotordurchmessers, wobei wegen der erhöhten Umfangsgeschwindigkeit die Wicklung aus Aluminium vorgesehen werden musste. Voraussetzung ist dabei, dass der Rotorkörper mit hinreichender Sicherheit hergestellt werden kann, denn die Steigerung der Generatorgrösse ist wesentlich durch den Rotor begrenzt. Wenn man wie in obigem Beispiel die Höchstbeanspruchung am Bohrungsrande bei der Ueberdrehzahl mit 60 % der Streckgrenze annimmt, so ergibt sich, dass für einen gegebenen Rotordurchmesser eine bestimmte Mindest-Streckgrenze erforderlich ist, etwa wie folgt:

Rotor-Durchmesser	mm	700	800	900	1000
Mindest-Streckgrenze	kg/mm ²	30	35	40	50

Es ist hieraus zu entnehmen, dass für Rotordurchmesser bis etwa 800 mm mit geglähtem S.M.-Stahl auszukommen ist, wobei durch den Glühprozess spannungsfreie Körper erhalten werden. Anders verhält es sich für grössere Durchmesser; wegen der erforderlichen höheren Streckgrenze ist legierter Stahl zu verwenden, der, um auf die verlangten Eigenschaften zu kommen, vergütet, d. h. gehärtet und angelassen werden muss. Ein solcher Vergütungsprozess ist ein schwieriger und nicht scharf kontrollierbarer Vorgang, und es besteht die Möglichkeit innerer Spannungen, infolge ungleicher Abkühlung der äusseren Oberflächen und der inneren Zonen, Spannungen, die sich in gewissem Sinne zu der Eigenbeanspruchung addieren und die Sicherheitsspanne verringern. Leider gibt es bis heute noch keine Methode, die mit einiger Sicherheit solche innere Materialspannungen erkennen, geschweige denn, ihrer Grösse nach bestimmen lässt. Diese Spannungen lassen sich bis zu einem gewissen Grad beheben durch Eindrehungen von tiefen Nuten in der Umfangsrichtung; solche Nuten sind aber gerade bei grossen Rotoren, speziell bei grosser Ballenlänge aus konstruktiven Gründen nicht erwünscht, weil dadurch der Körper zu sehr geschwächt wird. Trotz eingehender und umfassender Prüfung des Materials durch alle bekannten Verfahren und Methoden (Festigkeitsproben an den Enden des Ballens, Radialproben aus dem Ballen selbst, Prüfung des Bohrkerns, Kerbschlagproben, Aetzproben usw.) und trotz sorgfältiger Untersuchung des Rotorkörpers auf sichtbare Materialfehler, bleibt somit ein unbestimmter Faktor der inneren Spannung bestehen, dessen Einschätzung schwierig, ja unmöglich ist. Diesen

Faktor, der die Sicherheit eines Rotorkörpers beeinträchtigt, oder sogar in Frage stellen kann, zu eliminieren, ist eine Aufgabe, die durch den Metallurgen zu lösen ist. Die Stahlwerke haben denn auch, gestützt auf Erfahrungen mit derartigen Grenzschmiedestücken, bereits Mittel und Wege gefunden, um die Entstehung von Materialfehlern und von Materialspannungen auf ein Mindestmass zu reduzieren, einerseits durch Anwendung gewaltiger Schmiedepressen, welche ein energisches Durchschmieden des Stückes ermöglichen (grössere Gleichmässigkeit der Materialeigenschaften), anderseits durch Zusatz gewisser Materialien, welche den Vergütungsprozess erleichtern.

Auf jeden Fall ist die Möglichkeit des Baues grösster Turbo-Generatoren begrenzt durch den Rotorkörper, denn die Schwierigkeit der Herstellung einwandfreier Schmiedestücke wächst mit deren Abmessungen. Angesichts dieser Tatsache ist der Konstrukteur gezwungen, sobald gewisse Abmessungen überschritten werden, von dem einteiligen Rotorkörper überzugehen auf eine mehrteilige Bauart, etwa wie sie in Fig. 4 dargestellt ist: der mittlere Teil als Hohlzylinder stellt ein einfaches

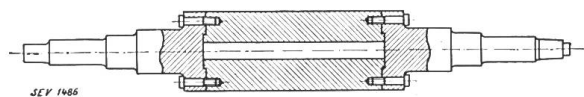


Fig. 4.

Rotorkörper; mittlerer Teil als Hohlzylinder ausgebildet.

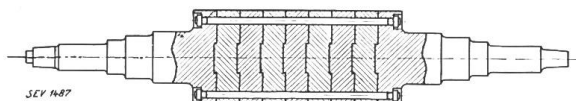


Fig. 5.

Rotorkörper; aus Scheiben zusammengesetzt und durch Zugstangen zusammen gehalten.

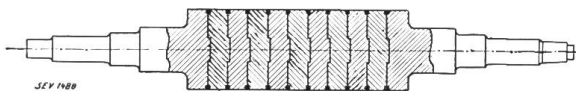


Fig. 6.

Rotorkörper; aus Scheiben zusammengesetzt und am Umfange zusammengeschweisst.

Stück dar, erheischt zu seiner Anfertigung einen bedeutend kleineren Block und seine Form bietet für das Verschmieden wie für das Vergüten wesentliche Vorteile, insbesondere dadurch, dass die Durchbohrung wesentlich grösser gehalten werden kann, als bei einem Rotorkörper mit angeschmiedeten Wellenenden; jedenfalls sind die Fehlerquellen weitgehend vermindert. Eine weitere Bauart, die ebenfalls in Betracht kommen kann, ist diejenige, welche den Rotorkörper aus Scheiben zusammensetzt (Fig. 5). Die Scheiben erhalten keine zentrale Bohrung, die Beanspruchung ist dadurch eine geringe, innere Spannungen sind vermieden und vermöge ihrer Form und ihrer geringen Abmessungen können die Festigkeitswerte beliebig hoch gewählt werden. Ein so aufgebauter Körper muss durch kräftige Zugstangen zusammengehalten werden und ist für Rotoren mit grösserem Durchmesser,

insbesondere für vierpolige Rotoren geeignet, dagegen nicht für zweipolige Rotoren (3000 U/m). Ein Vorschlag, die einzelnen Scheiben am Umfange zusammenzuschweiszen (Fig. 6) verdient Beachtung; Versuchsausführungen sind im Bau.

2. 88 500 kVA, 1800 U/m, 13800 V, 60 Per/s, $\cos \varphi = 0,85$, 75 000 kW. Dieser Generator bildet einen Teil der für die Anlage Hellgate (New York) gebauten Turbo-Gruppe von 160 000 kW; diese Gruppe besteht bekanntlich aus einem Generator von 100 000 kVA, 1200 U/m und einem solchen von 88 500 kVA, 1800 U/m; die Drehzahlen waren durch die Dampfseite gegeben. Im Rahmen der vorliegenden Studie ist nur der Generator von 1800 U/m interessant. Er wird bezüglich Leistung nur übertroffen von dem für die gleiche Zentrale von einer amerikanischen Firma gebauten Generator von 94 000 kVA und 1800 U/m. Den allgemeinen Aufbau zeigt Fig. 7; derselbe weist grundsätzlich dieselben Gesichtspunkte auf, wie sie für den oben beschriebenen Generator von 3000 U/m erwähnt wurden. Eine Ausnahme macht der Rotor: derselbe wurde mit Rücksicht auf seine Abmessungen aus drei Teilen zusammengebaut, dem mittleren Teil als Hohlzylinder und den zwei Lagerzapfen, deren Erweiterungen ebenfalls Teile des eigentlichen Rotorkörpers bilden;

die Lagerzapfen sind in der Bohrung des Hohlzylinders eingepresst und ausserdem durch Schrauben mit demselben verbunden. Ein einteiliger Rotor kam in diesem Falle nicht in Betracht, da ein derartiges Schmiedestück — dasselbe hätte ein Gewicht von 60 t haben müssen — nicht mit genügender Sicherheit hätte hergestellt werden können. Schon die Herstellung des Schmiedestückes für den Hohlzylinder im Gewicht von ca. 35 t bot reichliche Schwierigkeiten und es musste ein zweites Stück hergestellt werden, nachdem das erste auf Grund der Materialproben und Untersuchungen nicht befriedigte. Verwendet wurde ein Nickelstahl von 40–45 kg/mm² Streckgrenze, 65–75 kg/mm² Zerreissfestigkeit bei 14–16 % Dehnung. Die kritische Drehzahl des Rotors liegt ca. 20 % über der Nenndrehzahl.

Die höchsten Materialbeanspruchungen des Rotorkörpers bei der normalen Drehzahl sind in den Rotorzähnen ca. 7 kg/mm² und ca. 17 kg/mm² am Innenrand,

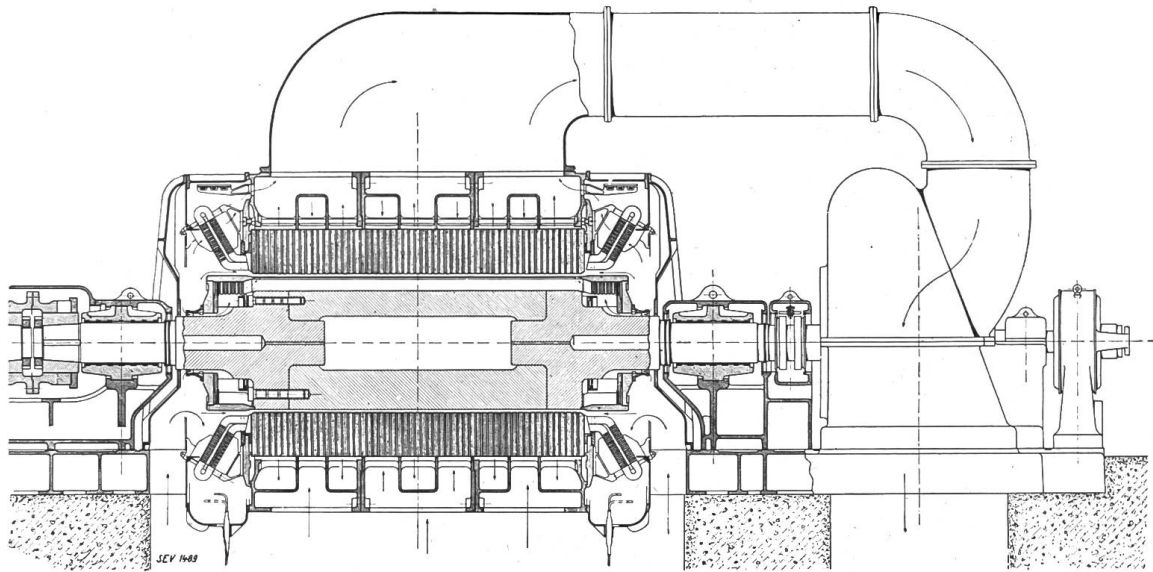


Fig. 7.

Dreiphasen-Generator 88 500 kVA, 1800 U/m für die Anlage Hellgate (New York).
(Masstab ca. 1 : 95.)

die max. Beanspruchung erreicht also bei der Schleuderdrehzahl (125 %) ca. 60 % der Streckgrenze.

Für den in Frage stehenden Rotor kam auch die Anwendung eines Platten-Rotors, d. h. durchgehende Welle und aufgeschrumpfte Platten, nicht in Betracht, da die Welle zu schwach ausgefallen wäre. Die Verluste dieses Generators bei 75000 kW und $\cos \varphi = 0,85$ sind:

	kW
Statoreisen	470
Statorkupfer	210
Rotorkupfer	200
Zusatzverluste	300
Luftreibung des Rotors . .	250
Verluste im Lüfter	320
Lagerreibung	250

total: 2000 kW = 2,6 %.

Das Gewicht des Generators ohne Lager, Grundplatte und Erreger beträgt ca. 200 t oder 2,25 kg/kVA.

3. 100 000 kVA, 1500 U/m, 6500/13000 V, 50 Per/s, $\cos \varphi = 0,75$. Dieser Generator ist für das Kraftwerk Zschornowitz der Elektrowerke bestimmt und ist

zurzeit der grösste in Europa zur Aufstellung gelangte Generator bei 1500 U/m. Fig. 8 zeigt einen Längsschnitt des Generators. Der Stator ist in gleichem Sinne aufgebaut, wie die beiden oben beschriebenen; seine Wicklung ist in zwei ganz unabhängige Wicklungen aufgeteilt, mit besonderen Klemmen. Es ist beabsichtigt, die Maschine vorerst mit 6500 V zu betreiben und die zwei Stromkreise parallel zu schalten oder jede der beiden Wicklungen auf ein besonderes Versorgungsgebiet arbeiten zu lassen; daneben besteht die Möglichkeit, die Stromkreise in Serie zu schalten zum Betriebe mit 13000 V. Der Stator wurde an Ort und Stelle geblecht und bewickelt, da einerseits ein Transport des fertigen Stators der Abmessungen wegen nicht möglich war, und andererseits eine Teilung des Stators und die Trenn-

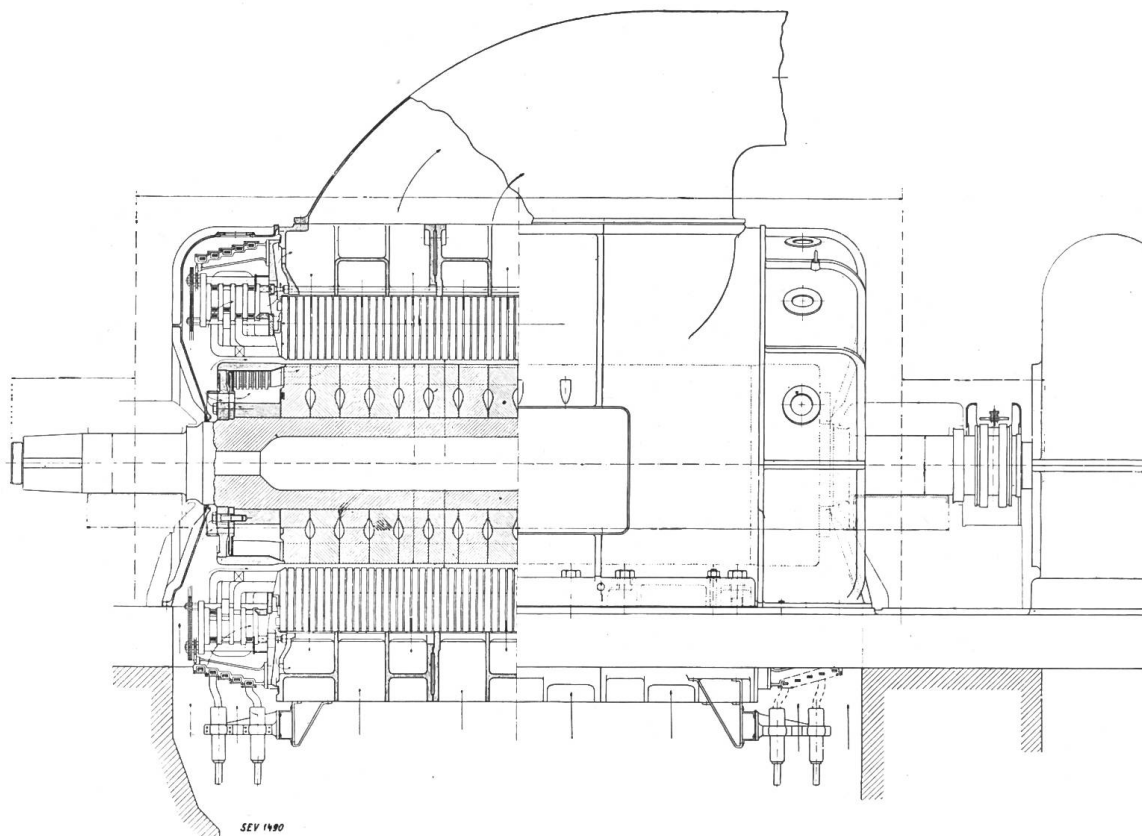


Fig. 8.

Dreiphasen-Generator 100 000 kVA, 1500 U/m für das Kraftwerk Zschornowitz.
(Masstab ca. 1 : 73.)

fugen des Blechkörpers vermieden werden sollten. Das Gewicht des Generators beträgt ca. 235 t, oder $\sim 2,35$ kg/kVA.

Der Rotor weist eine von den bisher beschriebenen Generatoren abweichende Bauart auf, indem er als Platten-Rotor gebaut ist, d. h. auf einer durchgehenden Welle sind die Platten oder Ringe aufgeschrumpft, welche den Rotorkörper bilden. Als Material der Ringe wurde Ni-Stahl mit mindestens 55 kg/mm² Streckgrenze, 75–85 kg/mm² Zerreissfestigkeit und mindestens 15 % Dehnung verwendet; die Höchstbeanspruchung derselben beträgt am Innenrand unter Einrechnung der Schrumpfspannung und bei 125 % der Nenndrehzahl ca. 50 % der Streckgrenze. Die berechnete kritische Drehzahl liegt ca. 40 % über der Nenndrehzahl, der Rotor lief bei der Schleuderprobe sehr ruhig bei allen Drehzahlen bis 125 % der Nenndrehzahl. Dieser Generator ist wie die oben beschriebenen, und wiederum im Hinblick auf möglichste Herabsetzung der Verluste, mit Umlaufkühlung und mit aussen liegendem Lüfter versehen. Die Verluste setzen sich ungefähr wie folgt zusammen, bezogen auf 80 000 kW und $\cos \varphi = 0,8$:

	kW
Statoreisen	480
Statorkupfer	260
Rotorkupfer	250
Luftreibung des Rotors . .	300
Lagerreibung	280
Zusatzverluste	260
Lüfterverluste	370

total: 2200 kW $\cong$ 2,71 %.

Wenn man, gestützt auf die Daten des hier beschriebenen Generators, sich ein Bild machen will über die Möglichkeit des Baues grösserer Maschinen, so ist vorerst festzustellen, dass die Begrenzung auch hier wiederum durch den Rotor bestimmt wird. Der Rotorkörper muss ohnehin aus Ringen zusammengesetzt werden, der unsichere Faktor der innern Spannungen ist damit beseitigt, und es besteht die Möglichkeit, wegen der geringen Abmessungen der einzelnen Ringe, Material von der höchsten erhältlichen Festigkeit zu verwenden. Eine Verlängerung des Rotors unter Beibehaltung des Durchmessers ist möglich, doch nur in beschränkter Masse, ca. 15–20 %, dagegen ist es mit Rücksicht auf die Stärke der Welle angezeigter, und mit Rücksicht auf das Ringmaterial auch zulässig, gleichzeitig den Durchmesser zu vergrössern; man kommt damit auf eine erreichbare Leistung von ca. 150000 kVA bei $\cos \varphi = 0,8$ und 1500 U/m. Ein Generator von 160000 kVA, $\cos \varphi = 1$ und 1500 U/m ist in Amerika in Bau, allerdings für 25~, also zweipolig. Mit dieser Grösse ist man auch bezüglich Beförderung an der Grenze angelangt, indem ein solcher Rotor, der als ein Stück befördert werden muss, annähernd 120 t wiegt, d. h. die Tragfähigkeit der heute verfügbaren Spezialwagen würde bereits überschritten. Abgesehen von der Beförderungsfrage, die natürlich durch Beschaffung entsprechender grösserer Wagen zu beheben ist, besteht somit die Möglichkeit, Generatoren zu bauen, deren Leistungsfähigkeit dem heutigen und in der nächsten Zukunft bestehenden Bedürfnis entspricht; Fälle, wo Einheitsleistungen von Generatoren über 100000 kVA notwendig sind, werden nur selten sein, es sei denn, dass die Kraftwerkpraxis eine Entwicklung erfährt, die einer einschneidenden Umwälzung gleichkommt.

Was die Wirkungsgrade der grossen Generatoren anbetrifft, haben die obigen Beispiele gezeigt, dass die Verluste auf den geringen Betrag von 2,6–2,8 % herabgesetzt werden konnten, d. h. es werden bei $\cos \varphi = 0,8$ Wirkungsgrade von 97,2 bis 97,4 % erreicht; diese Werte können für die Maschinen noch höherer Leistung kaum oder nur unwesentlich gesteigert werden; das ist ohne weiteres erklärlich, wenn man die Zusammensetzung der einzelnen Verluste betrachtet; die bedeutenderen Posten sind nämlich solche, die infolge der Vergrösserung des Rotordurchmessers annähernd proportional mit der Leistung (Statoreisen, Lüftung oder sogar etwas mehr als proportional (Luftreibung) zunehmen.

Eine Verringerung der Verluste im allgemeinen scheint in bescheidenerem Masse noch möglich: für die Statoreisen-Verluste durch Verwendung hoher legierter Bleche, sofern die heute noch zu grosse Sprödigkeit derselben durch verbesserte Fabrikationsmethoden behoben werden kann. Sodann durch Verwendung eines Kühlmittels von geringerer Dichte, z. B. von Wasserstoff; dadurch könnten die Verluste durch Luftreibung und für Lüftung bedeutend vermindert und der Wirkungsgrad um rund 0,5 % verbessert werden. Obschon in den Vereinigten Staaten mit dieser Lüftungsart bei Synchron-Kondensatoren bemerkenswerte Resultate erzielt worden sind, stehen der Anwendung derselben für Turbo-Generatoren noch wesentliche Schwierigkeiten entgegen, insbesondere hinsichtlich der Abdichtung an der Welle. Die Zukunft wird zeigen, ob die mit dieser Kühlungsart verbundene Komplikation in der Konstruktion und im Betrieb den dadurch erzielbaren Gewinn am Wirkungsgrad auszugleichen imstande ist. Dieser Gewinn ist verhältnismässig gross, bezogen

auf die Generatorverluste allein, er erscheint aber viel weniger bedeutend, wenn man die Gesamtverluste einer Dampfkraftanlage in Betracht zieht, deren Wirkungsgrad von der Kohle bis zur Sammelschiene nur 23 bis 27 % beträgt.

B. Generatoren für Wasserkraft-Anlagen.

Bei Dampfturbinen kommen praktisch nur zwei Drehzahlen in Betracht, nämlich 1500 und 3000; anders bei Wasserkraftanlagen, wo die Drehzahlen alle möglichen Werte annehmen können, die sich nach der Turbinenart, nach dem verfügbaren Gefälle usw. richten, also in der Hauptsache nach den hydraulischen Verhältnissen. Dazu kommt, dass die Anordnung mit liegender oder stehender Welle gewählt werden kann, wobei allerdings die letztere für grosse Leistungen fast ausschliesslich

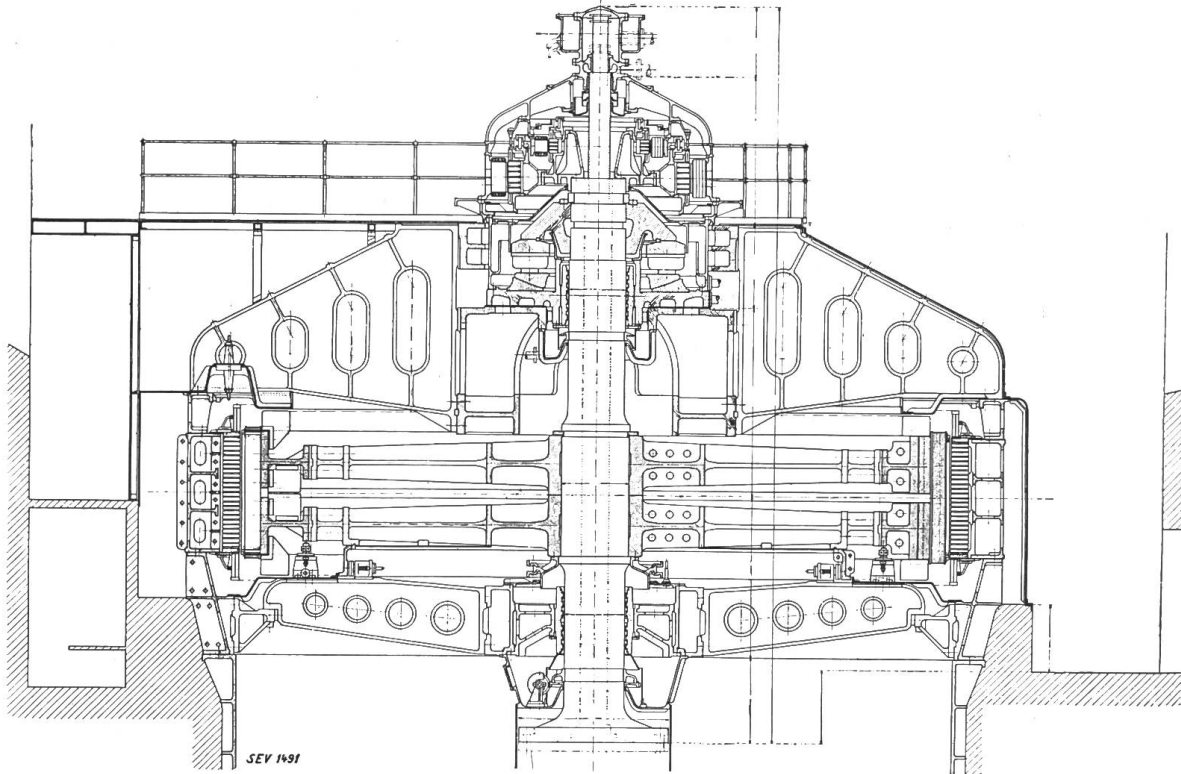


Fig. 9.

Dreiphasen-Generator 35 000 kVA, 75 U/m für das Kraftwerk Ryburg-Schwörstadt.
(Masstab ca. 1 : 115.)

zur Anwendung gelangt. Als weitere Momente, welche die Abmessungen und in gewissem Sinne auch die Begrenzung der Ausführbarkeit bestimmen, sind zu nennen: das im Polrad unterzubringende Schwungmoment, das für die Regulierverhältnisse der Turbine genügen muss, ferner die Durchgangsdrehzahl, welche ebenfalls von den hydraulischen Verhältnissen abhängig ist; sie beträgt normalerweise 180 bis 200 % der Nenndrehzahl, erreicht aber in vielen Fällen Werte von 250 % und mehr. Als Beispiel eines Generators, der sich wegen seiner Abmessungen auszeichnet, sei in Kürze die Konstruktion des Generators für das im Bau befindliche Kraftwerk Ryburg-Schwörstadt angeführt: einen Längsschnitt stellt Fig. 9 dar. Die Maschine ist bezüglich Abmessungen die grösste in Europa gebaute. Der Rotordurchmesser misst 9,4 m, das Gehäuse hat einen Durchmesser von 10,8 m und der Blechmantel hat eine grösste Breite von 13,5 m; die Höhe des Generators einschliesslich Erreger vom Kupplungsflansch ab gerechnet beträgt 9,8 m. Das Gewicht des Generators einschliesslich Erreger beträgt ca. 550 t, dasjenige des Polrades mit Welle ca. 250 t und das Schwungmoment GD^2 desselben ca. 12 500 tm^2 . Gerade bei dieser Maschine ist es augenfällig, wie der Charakter einer elektrischen Maschine in den Hintergrund tritt und der Aufbau in der Hauptsache ein mechanisches Problem darstellt: einer-

seits die Tragkonstruktion für das Spurlager, das eine Belastung von 900 t aufzunehmen hat, anderseits das Polrad, das für eine Durchgangsdrehzahl von 185, entsprechend der 2,5-fachen Nenndrehzahl, gebaut ist. Das Polrad ist in Stahlguss ausgeführt, Radstern und Radkranz sind mehrteilig. Diese Ausführung wurde gewählt mit Rücksicht darauf, dass das Rad in der Fabrik komplett zusammengebaut und der Schleuderprobe unterworfen und hernach für den Transport wieder zerlegt werden muss. Die weitgehende Unterteilung hatte weiter den Zweck, die Abmessungen und die Formgebung der einzelnen Teile so zu gestalten, dass sie gusstechnisch die grösste Sicherheit für die Gewinnung einwandfreier Stücke bot. Bei der Ausbildung des ganzen Rades und insbesondere bei der Verbindung der einzelnen Teile unter sich musste den Beanspruchungen durch die Zentrifugalkräfte und den Ausdehnungen Rechnung getragen werden, welche bei dem grossen Durchmesser schon ganz nennenswerte Beträge ausmachen.

Wie bei den Turbo-Generatoren ist auch hier und bei den Generatoren für Wasserkraftanlagen überhaupt die mögliche Grenzleistung in der Hauptsache bestimmt durch die Rotorkonstruktion; wenn man die üblichen Bauarten und Polbefestigungsarten, sowie die heute erhältlichen Baustoffe berücksichtigt und als Durchgangsdrehzahl die 1,8 bis 2-fache Nenndrehzahl zugrunde legt, so kann man für die verschiedenen Drehzahlen etwa folgende Grenzleistungen als ausführbar bezeichnen:

Nenndrehzahl U/m	1000	750	600	500	375	300	250 und weniger.
Grenzleistung kVA	20000	30000	40000	60000	70000	100000	> 100000

Die grössten bisher gebauten oder in Bau befindlichen Generatoren sind:

U/m	kVA	
750	13 500	Lac d'Oö
630	24 000	Venina
500	30 000	Mese
375	35 000	Terni (Galleto)
333	35 000	Schluchseewerk
300	40 000	Herdede
187	45 000	Queenston
138	40 600	Lexington
107	65 000	Niagara
88,2	77 500	Dneprostoi
81,8	40 000	Conowingo
75	35 000	Ryburg-Schwörstadt.

Ein Vergleich mit den oben als Grenzleistungen angeführten Werten zeigt, dass den Bedürfnissen der nächsten Zukunft nach grösseren Einheiten noch reichliche Entwicklungsmöglichkeit geboten ist; die Grenzleistungen liegen bedeutend über den bisher zur Ausführung gelangten Höchstleistungen. Eine weitere Steigerung ist entweder eine Frage der Beförderungsmöglichkeit oder eine solche der Herstellung.

Die Beförderung spielt hauptsächlich eine Rolle bei den höheren Drehzahlen, während sie bei niedrigen Drehzahlen zurücktritt, weil in solchen Fällen die Möglichkeit weitgehender Unterteilung eher vorhanden ist. Anderseits tritt die Frage der Herstellung mehr in den Vordergrund bei den niedrigen Drehzahlen, welche grosse Abmessungen und entsprechende Arbeitsmaschinen und Montageräume zur Voraussetzung haben. In allen Fällen aber sind (wie bei den Turbo-Generatoren) weitere Steigerungen in erster Linie von den Fortschritten abhängig, welche die Beschaffung zuverlässiger und widerstandsfähiger Konstruktionsmaterialien machen wird.