

Generatorenbau und Kraftwerkgestaltung

Autor(en): **Wiedemann, E.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins :
gemeinsames Publikationsorgan des Schweizerischen
Elektrotechnischen Vereins (SEV) und des Verbandes
Schweizerischer Elektrizitätswerke (VSE)**

Band (Jahr): **51 (1960)**

Heft 7

PDF erstellt am: **09.08.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-917028>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern. Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Generatorenbau und Kraftwerkgestaltung

Vortrag, gehalten an der Diskussionsversammlung des SEV am 18. November 1959 in Bern,
von E. Wiedemann, Baden

621.313.322-82.003

1. Gegenwärtige Situation

Die gesamten ausbauwürdigen Wasserkräfte der Schweiz repräsentieren zurzeit eine Leistung von etwa 9000...9500 MW. Die bisher installierte Leistung beträgt etwa 5500 MW, davon sind rund zwei Drittel in Speicherwerken und ein Drittel in Laufkraftwerken installiert. Die jährliche Zunahme der installierten Leistung wird künftig — etwas weniger als in den letzten zwei Jahren — auf etwa 350...450 MW geschätzt.

Die in der Schweiz bei den drei generatorbauenden Firmen zur Verfügung stehende Erzeugungsmöglichkeit beträgt — unter Einschluss der grossen, zurzeit im Ausbau begriffenen Fabrikationserweiterungen — etwa 1000...1200 MW; d. h. die generatorbauenden Firmen sind nach Deckung des Inlandbedarfes neuerdings befähigt oder besser gesagt gezwungen, schon bald für etwa 60...65 % ihrer Erzeugungsmöglichkeit von Wasserkraftgeneratoren Auslandsaufträge zu suchen. Mit Ausnahme von Norwegen, wo die Generatorfabrikationsmöglichkeit wesentlich kleiner ist als der Inlandsbedarf, liegen die Verhältnisse in den anderen europäischen Ländern ähnlich. Dazu kommt, dass Wasserkraftgeneratoren ein materialintensives Industrieprodukt sind. 55...60 % der Herstellungselbstkosten sind Materialausgaben. Das Rohmaterial stammt praktisch zu 100 % aus dem Ausland; aber auch der Auslandsanteil der Halbfabrikate am Gesamtmaterial beträgt bei manchen Generatorarten, z. B. Generatoren mit Schichtrotoren und geblechten Polen, bis zu 65 %.

Bei den Bauvorhaben in der Schweiz handelt es sich in erster Linie um Hochdruck-Wasserkraftwerke mit relativ rasch laufenden Maschinen, während der Export zum grossen Teil auf Generatoren für Flusskraftwerke mit niederen Gefällen und entsprechend niederen Drehzahlen basiert.

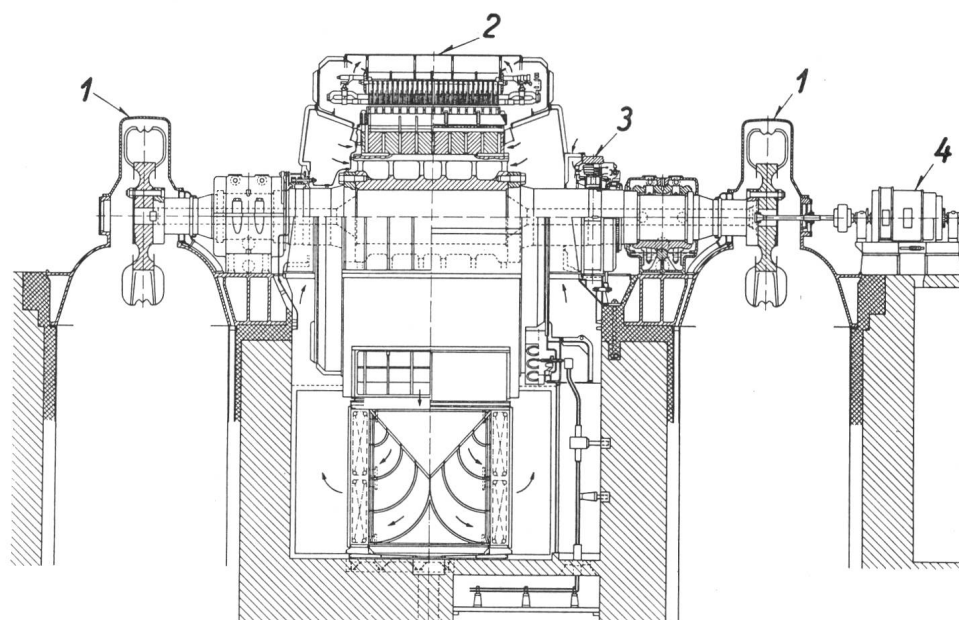
Die gesamte elektromechanische Ausrüstung eines Wasserkraftwerkes beträgt bei Hochdruckkraftwerken etwa 12...16 % und bei Niederdruckkraftwerken etwa 18...22 % der Gesamtkosten. Der entsprechende Anteil für die Generatoren allein beträgt dann etwa 2...4 bzw. 5...7 %.

Diese Verhältniszahlen beeinflussen bis zu einem gewissen Grade die Aufwendungen für die konstruktiven Lösungen für den Generator, insofern als die Auswirkungen jeder Generatorverbilligung allein bei rasch laufenden grossen Generatoren für Speicherkraftwerke sich auf die Gesamtkosten weniger auswirken als bei langsam laufenden Generatoren für Flusskraftwerke. Umgekehrt wirken sich aber die Generatorabmessungen, Gewichte und Kranlasten auf die Gesamtgestehungskosten bei Hochdruckkraftwerken — insbesondere bei der Kavernenbauweise — im allgemeinen stärker aus.

2. Hochdruckkraftwerke

Auf diesem Gebiete haben die Schweizer Generatorfirmen eine führende Stellung in der Entwicklung, dank des Umstandes, dass die schweizerischen Kraftwerke und projektierenden Gesellschaften Entwicklungsaufgaben für sehr grosse Einheiten hoher Drehzahl stellen konnten. In vielen Fällen — insbesondere allen jenen, bei welchen die Grösse des Gefalles gar keine andere Turbinenart erlaubt — handelt es sich um Pelton-Turbinen-Antriebe.

Pelton-Turbinen-Generatoren werden sowohl horizontal als vertikal gebaut. Bei horizontaler Anordnung wird bei grossen Leistungen,



SEV 28829

Es ist nicht Aufgabe des Konstrukteurs, diese Zahlen zu kommentieren, sondern nur die Konsequenz zu ziehen, dass er mehr als noch vor wenigen Jahren, als die Produktionsmöglichkeit noch zu einem hohen Prozentsatz in der Schweiz verbraucht wurde, seine Konstruktionen auch auf aussereuropäische Anforderungen ausrichten muss.

die bezüglich Wassermenge und Drehzahl in einem Rad nicht verarbeitet werden können, die Turbinenleistung auf zwei Turbinen verteilt. Normalerweise ist dann der Generator zwischen den beiden Turbinenrädern angeordnet. Im Beispiel von Fig. 1 ist die Haupterregmaschine zwischen den Lagern eingebaut, während Hilfsregger, Hilfsgenerator und Pen-

Fig. 1

Zwischen zwei Turbinenrädern
angeordneter Generator

Kraftwerk Monpezat,
63 MVA, 428 U./min
1 Pelton turbine; 2 Generator;
3 Haupterregmaschine;
4 Hilfsmaschine

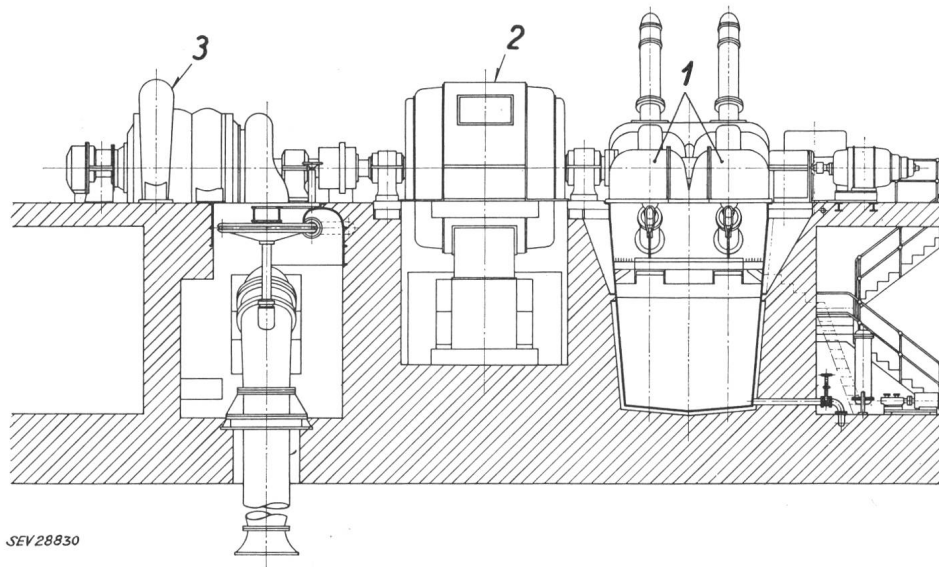
delgenerator elastisch gekuppelt ausserhalb einer Turbine angeordnet sind.

In Norwegen wird in fast allen Fällen eine andere Anordnung gewählt. Dort sind beide Turbinen auf einer Seite des Generators und der Erreger auf der freien Seite. Diese Anordnung bringt gewisse bauliche Ersparnisse wegen der teilweise gemeinsamen Wasserführung für beide Turbinen. Dafür wird aber der Rad-Ein- und Ausbau, der z. B. bei sandhaltigem Wasser oft notwendig ist, erheblich erschwert. In diesem Falle ist auch ein drittes Lager notwendig.

In den Fällen, in denen die Turbinen gleichzeitig mit einer Pumpe arbeiten (Fig. 2), werden auch in der Schweiz die Peltonräder nebeneinander und der Generator zwischen den Turbinen und der Pumpe angeordnet.

Die Peltonräder für horizontale Aufstellung werden ein- oder zweidüsig pro Peltonrad gebaut. Bei der horizontalen Anordnung ist es auch bei zweidüsigter Ausführung baulich nicht möglich, die Düsen so anzuordnen, dass sich die Strahldrücke bezüglich Lagerreaktion aufheben. Der die Lager lie-

Fig. 2
Generator zwischen zwei
Turbinenrädern und einer Pumpe
Kraftwerk Motec
29 MVA, 750 U./min
1 Peltonturbine; 2 Generator;
3 Pumpe



fernde Generatorbauer muss deshalb bei Anordnung und Dimensionierung der Lager den Strahldruck berücksichtigen. Die Lagerbelastung durch den Strahldruck allein ist vielfach in der Grössenordnung von mehr als dem halben Rotorgewicht. Die Resultierende aus dem Strahldruck und dem halben Rotorgewicht beträgt unter Berücksichtigung der Tatsache, dass bei vorübergehendem Betrieb mit nur einem Peltonrad noch eine einarmige Hebelwirkung eintritt, das 1,4- bis 2fache des Rotorgewichtes. Wenn die Abweichung der Resultierenden von der Vertikalen mehr als etwa 45° beträgt, so ist es vielfach üblich, die Lagerschale nicht horizontal, sondern schräg zu teilen. Eines der beiden Lager wird als Axial-Führungslager gebaut.

Die notwendige Tragkraft des Kranes und die Generatorgrösse beeinflussen — insbesondere bei Kavernen — die Bauaufwendungen. Vor allem geht bei horizontalen Maschinen die Länge des Aggregates und bei Vertikalmaschinen die Höhe des Aggregates in das Volumen der Kaverne proportional ein, also in beiden Fällen die Eisenlänge des Generators, mit der die Leistung auch proportional steigt, während grösserer Durchmesser quadratisch grössere Leistung ergibt und Anordnungen für die Montage möglich sind, bei denen der Durchmesser nur proportional oder weniger in das Kavernenvolumen eingeht.

In Fig. 3 ist gezeigt, wie bei horizontaler Aufstellung des Aggregates seitlich der Mittelachse des

Maschinenhauses der komplette Rotor oder die um 90° verdrehte Statorhälfte seitlich an den montierten Maschinen vorbeigefahren werden kann, um dann verdreht auf den Unterteil des Stators aufgesetzt zu werden.

In allen Normalfällen ist das Gewicht des kompletten Rotors ganz wesentlich grösser als das des Stators und deshalb für die Tragkraft des Kranes massgebend. Wenn man sich entschliesst, die Pole im Kraftwerk in das in den Lagern liegende Polrad zu montieren, kann die Tragkraft des Kranes bei rasch laufenden Maschinen ganz erheblich reduziert werden, unter Umständen derart, dass sogar der Rotor ohne Pole leichter ist als die gewickelte halbe Statorhälfte. Im Falle von Fig. 3 ist das Gewicht einer Statorhälfte 55 bzw. 60 t, das Gewicht des kom-

pletten Rotors 197 t und das Gewicht des Rotors ohne Pole 142 t. Das Einsetzen der Pole in den eingebauten Rotor setzt allerdings, insbesondere bei Vertikalmaschinen, eine Konstruktion voraus, die dies ermöglicht, also Klauenpole und an den Polen selbst befestigte Spulenabstützungen, also ohne Spulenabstützungen am Rad.

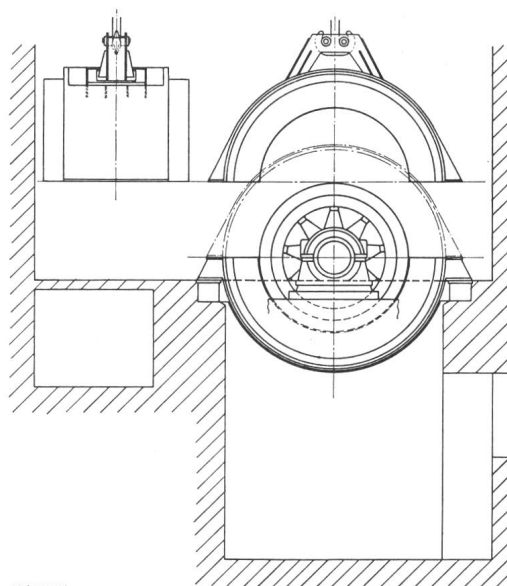


Fig. 3
Montage eines horizontalen Wasserkraftgenerators

Bei der vertikalen Anordnung von Pelton-Turbinen-Generatoren für grosse Leistungen handelt es sich wohl immer um mehrdüsig einrädiger Anord-

nicipale, Milano, im Bau. Sie hat fliegende 4düsig Peltonräder und 2 Generatoren mit einer Leistung von 115 MVA und 333,3/610 U./min.

Francis-Turbinen für Hochdruck-Kraftwerke sind heute bis zu Brutto-Gefällen von 540 m in Norwegen gebaut und sind für noch wesentlich grössere Gefälle in Projektierung. Für das in Projektierung befindliche Pumpspeicherwerk Hotzenwald der Schluchsewerke sind horizontale Francis-Turbinen für ein Gefälle von 610 m mit Generatorleistungen von rund 100 MVA bei 750 oder 1000 U./min vorgesehen. Wenn nicht besondere Gründe — z. B. Aufteilung in zwei Turbinen oder Anordnung von Turbine und Pumpe für horizontale Aufstellung ausschlaggebend sind, so ist die übliche Anordnung vertikal. Die im Kraftwerk Fionnay der For-

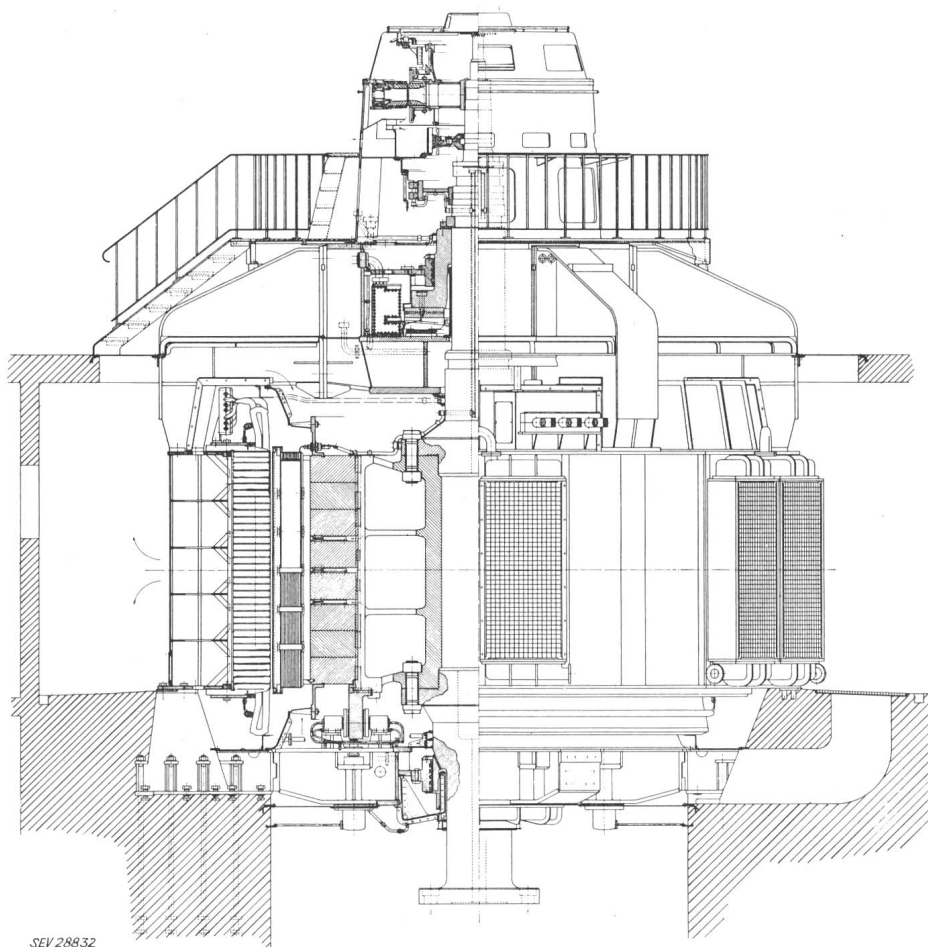


Fig. 4
Typische Generatorbauweise für
horizontale Francis-Turbine
Kraftwerk Tokke
120 MVA, 375 U./min

nung. In diesem Falle ist es üblich, die Düsen so zu verteilen, dass sich die Lagerreaktionen aus den Strahldrücken aufheben. Dies scheint bei hohen Spurlagerbelastungen von einer gewissen Bedeutung wegen der Auswirkung einseitigen Strahldruckes auf die Welle und auf das Spurlager. Die Wellendurchbiegung aus einseitigem Strahldruck entspricht derjenigen einer nicht umlaufenden Kraft, z. B. eines einseitigen magnetischen Zuges, wie er durch exzentrische Montage vom Gehäuse gegenüber dem Polrad verursacht wird. Die ausgeglichene Anordnung der Düsen wirkt sich natürlich auch vorteilhaft auf die Lagerreibungsverluste im Halslager aus.

ces Motrices de Mauvoisin aufgestellten drei vertikalen Turbinen-Generatorsätze mit dem bisher grössten im Betrieb befindlichen Gefälle in der

Die in der Schweiz bekanntesten vertikalen Pelton-Turbinen-Anlagen sind wohl die des Eitzelwerkes mit Ein- und Dreiphasen-Generatoren von 18 MVA und die des Kavernen-Kraftwerkes Innertkirchen der Kraftwerke Oberhasli. Bei diesem ist ein fliegendes Peltonrad mit um 180° versetzten Düsen angeordnet. Die 5 Generatoren sind für 52,25 MVA und 420/790 U./min ausgelegt.

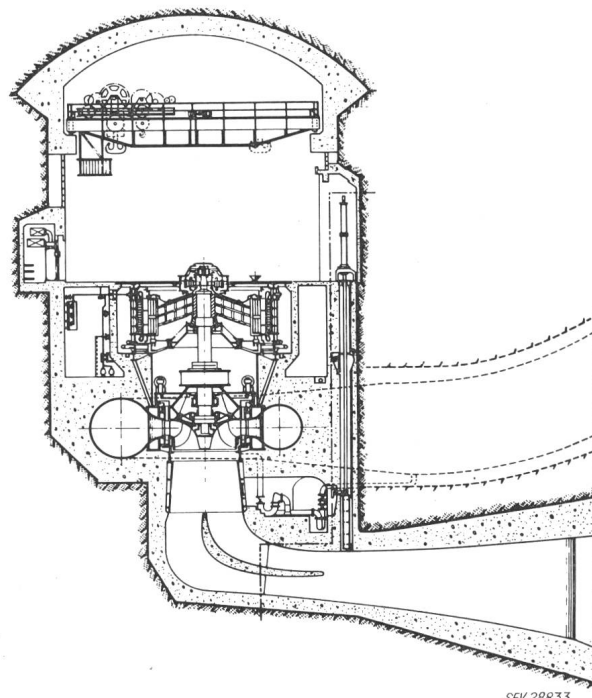


Fig. 5
Schirmgenerator mit Spurlager auf dem Deckel
in einer Kaverne
Maschinenhaus Picote, 72 MVA, 167 U./min

Ganz ähnliche Gesamtbauweise haben die Turbinen-Generatoren des Kraftwerkes Göschenen, 53 MVA, 500 905 U./min, sowohl für die Drei- als auch für die Einphasen-Generatoren, in diesem Falle allerdings mit 3 um je 90° versetzten Düsen.

Die zur Zeit wohl grösste Anlage dieser Art ist für das Kraftwerk Grosio der Azienda Elettrica Mu-

Schweiz von 465 m haben drei Generatoren von 60 MVA bei 750/1416 U./min.

Die wohl grössten in der typischen Generatorbauweise für Schnellläufer hergestellten Generatoren sind zur Zeit die im Bau befindlichen, für das Kraftwerk Tokke der Norwegischen Wasserbaudirektion in Auftrag gegebenen vier Generatoren von 120 MVA und 375 610 U./min (Fig. 4). Das Gefälle beträgt 377 m. Die Generatoren sind in der konventionellen Bauweise mit kombinierten Spur- und Halslagern im oberen Tragstern, mit Flanschwellen und über den Schleifringen abflanschbaren Aufbauten versehen.

Demgegenüber sind die drei langsamer laufenden Generatoren der Centrale de Picote (Portugal) 72 MVA, 167 U./min, in einer Kaverne als Schirmgeneratoren mit Spurlager auf dem Turbinendeckel gebaut (Fig. 5).

Bei vertikalen Anordnungen ergibt sich bisweilen eine sehr grosse Kavernenhöhe, um den Rotor in den Stator einzufahren. Um wenigstens die Bauhöhe von Erregermaschine, Hilfserregermaschine und Pendelgenerator nicht in die Kavernenhöhe eingehen zu lassen, wird dieser Aufbau stets separat angeflanscht. Grundsätzlich kann man in der Kavernenhöhe noch 2...2,5 m gewinnen, wenn man sich entschliesst, die Welle am eingefahrenen Rotorkörper anzufleischen. Aus fabrikatorischen sowie Transportgründen wird diese Anflanschung manchmal notwendig, aber dann doch der Wellenstummel vor dem Einfahren des Rotors ins Maschinenhaus angeflanscht und dadurch grosse Bauhöhe beansprucht. Montagemassnahmen, wie Einsetzen des Rotors ohne Pole und Anflanschen des Wellenstummels am eingefahrenen Rotor erhöhen natürlich die Montagezeit insbesondere bei Reparaturen beträchtlich, was andererseits gegen die erhebliche Ersparnis im Bau der Kaverne abzuwägen wäre.

Darüber hinaus muss man sich doch auch die Frage vorlegen, ob nicht schon die Ersparnisse an Auszugshöhe, die man in einzelnen Fällen erzielen könnte, wenn man das Spurlager unter den Rotor legen würde und über dem Rotor nur ein Halslager anordnet, genügend Anreiz sind, zu solcher Bauweise überzugehen, wie es bei Langsamläufern in USA und anderen Ländern üblich ist (Fig. 5).

Wenn man bedenkt, dass bei Dampfturbogeneratoren heute aus dem aktiven Rotorvolumen etwa die dreifache Leistung entnommen wird wie beispielsweise vor 10...15 Jahren und bei Wasserkraftgeneratoren die Ausnützung im gleichen Zeitraum nur um etwa 20...25 % gestiegen ist, so fragt man sich mit Recht «warum?». Bei Wasserkraftgeneratoren ist Wasserstoffkühlung, worauf zum grossen Teil die Leistungssteigerung bei Dampfturbogeneratoren zurückzuführen ist, nur beschränkt verwendbar, weil bei Gehäusedurchmessern über 4...5 m wegen des zu berücksichtigenden Explosionsdruckes die Wandstärken von Stator und Verschaltungen prohibitiv schwer und teuer werden. Nutzen aus höherer Isolationsklasse F oder H, also grösserer Erwärmung für den Rotor oder aus dem kalten Kühlwasser kann man gemäss den mit Recht wegen der Relativdehnungen bestehenden Vorschriften der einzelnen Länder auch nicht ziehen. Aber es gäbe dennoch Mittel, die Ausnützung des Rotors zu steigern. Man könnte z. B. daran denken, zur direkten Wasser-

kühlung der mit Hohlleitern ausgeführten Polspulen zu schreiten, was durchaus nicht unüberwindlich schwierig wäre. Damit könnte eine ganz erhebliche Steigerung der Leistung, bezogen auf das Rotorvolumen, erzielt werden. Allein solchen Ideen steht von vornherein hindernd im Wege, dass dieser Aufwand wenig oder nichts in der Dimensionierung einbringen würde, solange diese durch die Forderungen bezüglich Schwungmoment und Durchgangsdrehzahl bestimmt wird.

3. Allgemeine Angaben

Erschwerend für die Entwicklung im Wasserkraft-Generatorbau ist die in neuerer Zeit oft erhobene Forderung, dass die Beanspruchungen bei der Schleuderdrehzahl nicht grösser sein dürfen als ein gewisser Prozentsatz der Materialstreckgrenze — in der Regel zwei Drittel der Streckgrenze. Der rechnerische Nachweis solcher Überlegungen mag eine gewisse Berechtigung haben, wenn die Generatoren nicht geschleudert werden, wie dies bei Kettenrotoren üblich ist. Wenn aber schon der Generator im Werk des Herstellers, in dessen Schleudieranlage, im Beisein des Kunden der Schleuderprobe unterworfen wird, erscheint die Forderung auf Einhaltung eines Sicherheitsabstandes gegen die Streckgrenze ungerechtfertigt, und zwar insbesondere deshalb, weil diese Forderung ohne Festlegung der Berechnungsmethoden unklar ist und einen Anreiz gibt, möglichst primitive konventionelle Berechnungsmethoden zu verwenden, die Belastungskonzentrationen, mehrdimensionalen Spannungszustand, Kerbfaktoren usw. absichtlich ignorieren.

Ein weiterer Punkt, der eine gewisse Unsicherheit in der Dimensionierung bei den Generatorkonstrukteuren ergibt, ist der, dass in der Schweiz bei Offertausschreibungen praktisch nie eine Verlustbewertung angegeben wird, im Gegensatz zu manchen Ländern, in welchen der Konstrukteur von vornherein weiss, wie hoch das Verlustkilowatt bewertet wird und danach nicht die Maschine mit dem billigsten Herstellungspreis vorschlägt, sondern das Optimum aus Herstellungspreis und Verlusten richtig gegeneinander abwägt. Die Bewertung des Verlustkilowatt in anderen Ländern, z. B. den USA, geht bis zu etwa 2000 Franken und sogar noch höher. Eine Verlustbewertung in ähnlicher Höhe würde z. B. die Einsparung von 100...150 kW Verlusten pro Generator bei entsprechender Bewertung, also etwa 200 000...300 000 Franken pro Generator, bei Generatorwasserkühlung grosser raschlaufender Generatoren auch ohne Verkleinerung doch attraktiv machen.

Solche Wirtschaftlichkeitsüberlegungen mit Verlustbewertung und Bewertung der Auswirkung der Generatorbauweise auf Hochbauten oder Kavernen machen natürlich die Durchrechnung und Durchprojektierung zahlreicher Varianten nötig — einen Arbeitsaufwand, der bis anhin eine kaum tragbare Belastung der projektierenden Berechner und Konstrukteure dargestellt hat. Die Programmierung dieser Arbeiten auf digitalen Rechenautomaten mit Programmen, die bis zu Gewichten und Preisen gehen und selbsttätig optimieren, reduziert den Arbeitsaufwand aber auf einen Bruchteil des bisheri-

gen, so dass in naher Zukunft eine gründliche Untersuchung zahlreicher Varianten erleichtert wird.

Ein gewisser Zusammenhang zwischen Generator-konstruktion und Kraftwerksbau besteht auch bezüglich der Massnahmen gegen das Geräusch der Maschinen, das insbesondere bei den raschlaufenden Maschinen der Hochdruckkraftwerke allmählich gross wird.

Die Schallstärke, also die Schalleistung ($\mu\text{W}/\text{cm}^2$) und der Schalldruck, also der durch die Schallschwingung hervorgerufene Wechseldruck (μb) können nicht als Mass für die Schallempfindung benützt werden, da zwischen diesen Grössen und der Schallempfindung keine einfache Beziehung besteht. Als Mass für die Schallempfindung hat man den Begriff der Lautstärke eingeführt. Im Bereich mittlerer Frequenzen wächst die Schallempfindung annähernd mit dem Logarithmus der Schallstärke. Man braucht daher als Mass für die Schallempfindung eine logarithmische Skala, deren Einheit das «phon» ist. Das menschliche Ohr ist im allgemeinen in der Lage, Lärmpegel von 85...90 phon jahrelang ohne Schädigung zu ertragen. Um eine Minderung der Lautstärke um 20 phon zu erzielen, also z. B. von 90 auf 70 phon, ist es notwendig, 99 % der gesamten Schallenergie zu absorbieren. Eine Massnahme, die eine Lautstärkeverminderung um 10 phon erzielt, ist deshalb schon als sehr gut zu bezeichnen. Auf die Möglichkeiten der Geräuschverminderung aus dem Generator durch Schallisierung im einzelnen einzugehen, verbietet der geringe Erfahrungsumfang, der bisher zur Verfügung steht.

Eine Schwierigkeit bei der Geräuschbekämpfung ist, dass sie nur Wert hat, wenn an der lautesten von mehreren Geräuschquellen oder bei gleichstarken Geräuschquellen an allen Massnahmen zur Geräuschverminderung getroffen werden. Die Gesamtlautstärke mehrerer gleich lauter Schallquellen ergibt:

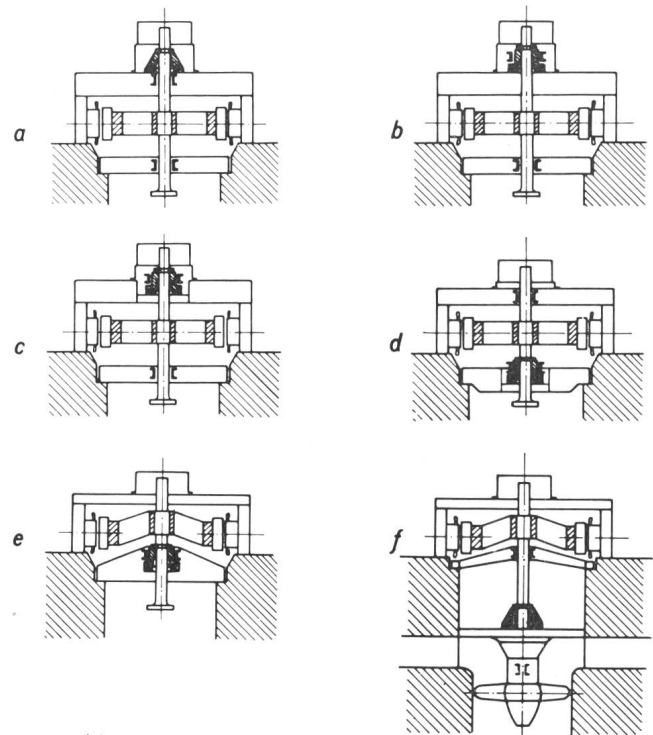
- bei 2 gleichen Geräuschquellen
eine Lautstärkezunahme von 3 phon
- bei 3 gleichen Geräuschquellen
eine Lautstärkezunahme von 5 phon
- bei 4 gleichen Geräuschquellen
eine Lautstärkezunahme von 6 phon

Das heisst, wenn Turbine und Generator als zwei Geräuschquellen etwa gleich laut sind, würde man nur 3 phon erzielen, wenn man den Generator geräuschlos bauen könnte und an der Turbine nichts unternehmen würde und umgekehrt. Wegen dieser Schwierigkeiten sind Massnahmen zur Geräuschverminderung an den Generatoren selbst noch im Anfangsstadium. Einige Versuche werden gegenwärtig in Biasca durchgeführt. Massnahmen zur Unterdrückung von Schallreflexionen in Kavernen sind auch in der Schweiz schon getroffen worden. So ist beispielsweise im Kraftwerk Peccia der Maggia-Kraftwerke die Kaverne mit Schallschluckmaterial zur Unterdrückung von reflektierten Schallwellen ausgekleidet.

4. Niederdruck-Laufkraftwerke

Niederdruck-Laufkraftwerke grösserer Leistung sind in der Schweiz nur am Rhein und an der Aare und einigen anderen Nebenflüssen möglich und vorhanden, bzw. weitere projektiert. In Europa haben

diese Kraftwerke für niedere Gefälle praktisch ausschliesslich Kaplan-Turbinen, weil bei der relativ kleinen Anzahl von Einheiten pro Kraftwerk und der starkschwankenden Wasserführung unserer Flüsse mit relativ geringen Staumöglichkeiten der flache Wirkungsgradverlauf von Kaplan-Turbinen über der

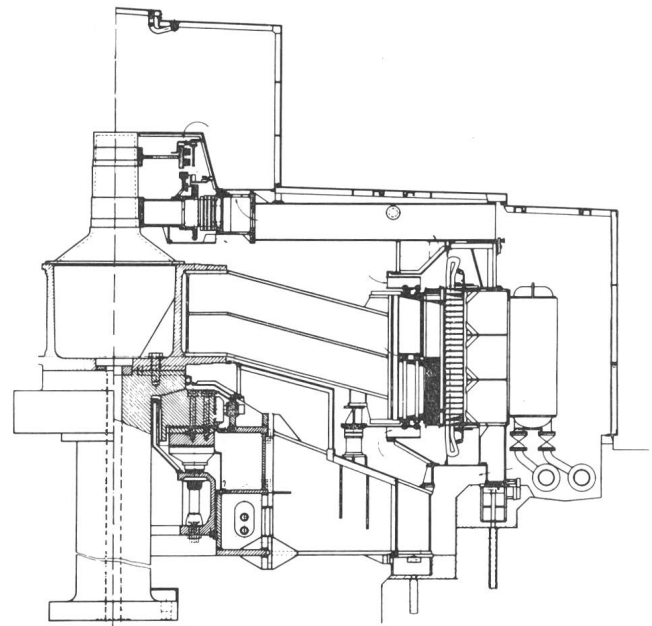


SEV 28834

Fig. 6

Lageranordnungen bei vertikalen Wasserkraftgeneratoren
Bezeichnungen siehe Text

Belastung grosse Vorteile bringt. Bei den riesigen Flüssen in den USA und der UdSSR liegen die Verhältnisse vielfach anders, so dass dort auch sehr grosse, langsamlaufende Einheiten mit Propeller-Turbinen mit feststehenden Laufradschaufeln oder Francis-Turbinen verwendet werden.



SEV 28835

Fig. 7

Beispiel eines modernen Schirmgenerators
Anlage Wilson-Dam, 60 MVA, 106 U./min

Die Anordnung der Maschineneinheiten für grosse Niederdruck-Laufkraftwerke ist ausschliesslich vertikal, und es sind verschiedene Lageranordnungen üblich, die sich auf den Hochbau auswirken (Fig. 6). Die klassische Bauweise *a*, wie sie z. B. bei den Rhein-Kraftwerken Ryburg-Schwörstadt, Albruck-Dogern und Reckingen usw. verwendet wurde, mit einem oberen Spurlager und zwei Halslagern und Flanschelle, ist weitgehend schon deshalb

In den USA sind die Anordnungen *d* und *e* der Fig. 6 mit kombiniertem Spur- und Halslager — die dort immer von Generatorlieferanten geliefert werden — im unteren Tragstern in neueren Kraftwerken fast allgemein üblich.

Die Frage, ob dabei ein oberes Halslager verwendet wird oder ein reiner Schirmtyp zur Ausführung kommt, ohne oberes Halslager, hängt im wesentlichen vom Verhältnis Statorbohrung zur Eisenlänge ab, d. h. davon, ob das Führungslager des kombinierten Lagers genügend weit in den schirmförmigen Rotortragstern hineingebaut werden kann, so dass das Moment aus Unwuchtkräften mal dem Abstand von Polradmitte zu Halslagermitte klein genug ist. Wegen der hohen Durchbrenndrehzahl von Kaplan-Turbinen, mit der die Laufruhe des Generators nach beendeter Montage ja nicht kontrolliert wird, ist man bei Kaplan-Turbinen bezüglich dieses Momentes vorsichtiger als bei Francis-Turbinen.

Die Ansicht, dass bei reinen Schirmgeneratoren der Aufbau einer direkt angetriebenen Erregermaschine-Hilfs-erregermaschine und Pendelgenerator nicht möglich wäre, weil die fliegende Anordnung

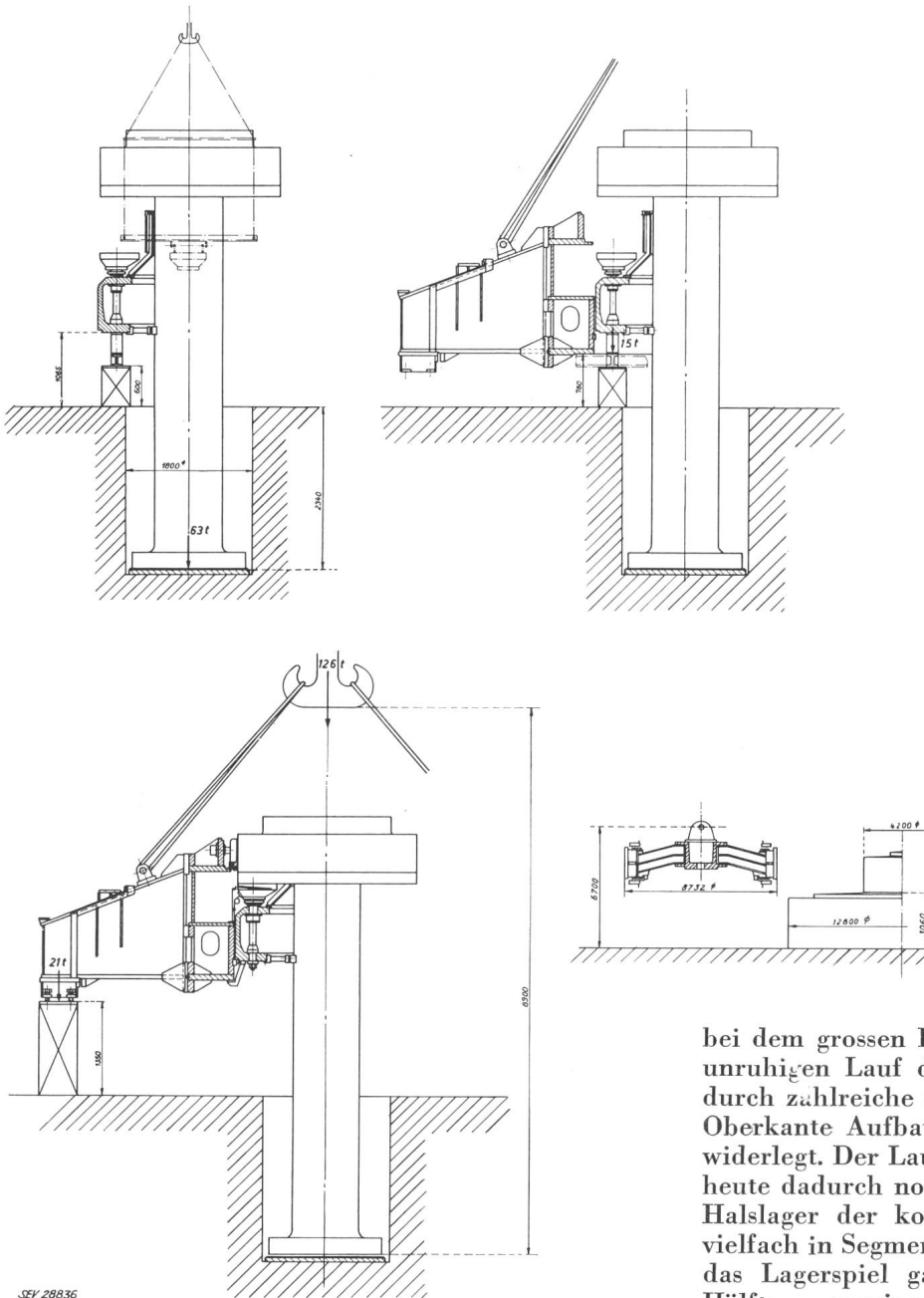


Fig. 8
Montagevorgänge für den
Generator in Fig. 7

durch andere Bauweisen abgelöst, weil heute viele Firmen kombinierte Spur- und Halslager bauen, die in Wellenlänge und Auszugshöhe sowie in den Lager-schmierungseinrichtungen vorteilhaft sind. Bei sonst gleichbleibender Anordnung kommt man dann auf die Bauweisen *b* oder *c* der Fig. 6, die sich nur dadurch unterscheiden, dass bei der Anordnung *b* das Lager auf dem Tragstern liegt und bei der Anordnung *c* in diesen hineinversenkt ist. Eine Ausführung nach *c* ist z. B. gewählt für die 5 Generatoren für den Assuan-Damm mit 49 500 MVA, 100/345 U./min.

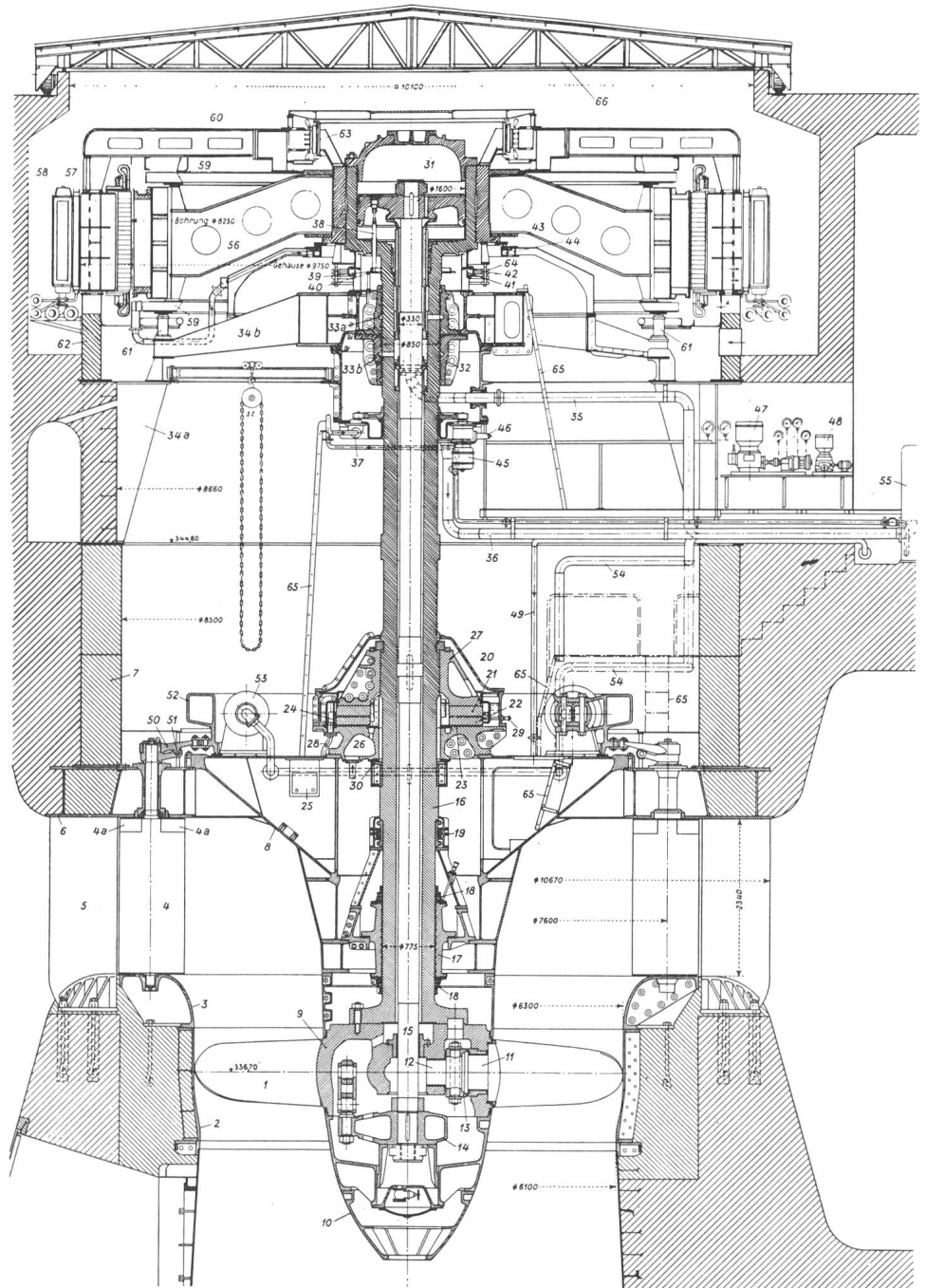
bei dem grossen Lagerabstand zu einem prohibitiv unruhigen Lauf dieser Hilfsmaschinen führen, ist durch zahlreiche solche Bauarten mit Abstand der Oberkante Aufbau bis Mitte Halslage von 4...5 m widerlegt. Der Lauf dieser fliegenden Aufbauten ist heute dadurch noch wesentlich verbessert, dass die Halslager der kombinierten Spur- und Halslager vielfach in Segment-Bauweise gebaut werden, wobei das Lagerspiel ganz bedeutend — etwa auf die Hälfte — verringert werden kann. In jedem Falle werden zur Verringerung der Auszugshöhe die fliegenden Aufbauten, ob es sich um Erreger oder beispielsweise um einen Wellengenerator handelt, so angeordnet, dass sie abnehmbar sind und die Kranhakenhöhe nicht beeinflussen.

Ein Beispiel eines modernen Schirmgenerators amerikanischer Bauweise zeigt Fig. 7. Es handelt sich um drei im Bau befindliche Generatoren mit 60 MVA und 106/212 U./min für das Kraftwerk Wilson-Dam der Tennessee Valley Authority in den USA. Das Spurlager, für 960 t im vorliegenden Falle, ist so gebaut, dass für jedes einzelne Segment die

Belastung einstellbar ist und während des Betriebes einzeln und die Summe, also auch der totale hydraulische Schub, gemessen werden kann. Das Spurlager hat für An- und Auslauf Druckölentlastung, die zweckmässig stets dann verwendet wird, wenn die spezifische Stillstandsbelastung einen hohen Prozentsatz der Totalbelastung im Lauf ausmacht und wenn bei grossen Langsamläufnern das Rotorgewicht zu gross ist, um den Rotor vor dem Anlauf anzuheben, wie das mit schnelllaufenden Generatoren mit kleinerem Rotorgewicht vielfach gemacht wird. Bemerkenswert ist noch, dass der Laufring aus einem Stück mit der Welle geschmiedet ist, eine Ausführung, die in den USA üblich ist und zu ausserordentlich grossen Schmiedestücken führt, im vorliegenden Falle mit dem grössten Durchmesser von mehr als 2,5 m. Bei diesem Generator werden die Verschaltungen mit Geräusch-Absorbtionsbelag ausgekleidet.

In Fig. 8 sind für diese Freiluft-Generatoren die Montagevorgänge gezeigt. Aus Zeitersparnisgründen für die Montage wird unter Zuhilfenahme einer Montagegrube zunächst der Spurlager ring auf einen Support gestellt, dann die Welle eingefahren, die inneren Ölabdichtungen montiert und schliesslich die Spurlagersegmente. Dann wird der untere Armstern gemeinsam mit den angeschraubten Sohlplatten darübergefahren und die Befestigungskeile vom Spurlager gegenüber dem unteren Tragstern eingesetzt. Schliesslich werden nach Anheben des Tragsternes

Fig. 9
Anlage Braunau
32 MVA, $83\frac{1}{2}$ U./min



SEV 28837

die Keile befestigt und der komplette untere Tragstern mit der Welle angehoben und in den Generator eingefahren. Zum Schluss wird der komplette Rotor, der an einem zur Lieferung des Generators gehörigen Tragstück für kleinste Auszugshöhe befestigt ist, auf die Welle gesetzt und befestigt.

Das sorgfältige Studium solcher Montagevorgänge gemeinsam mit dem Kraftwerkbauer gehört zu den wichtigsten Aufgaben des Konstrukteurs, um zu einer zweckmässigen Bauweise zu kommen.

Die Anordnung *f* in Fig. 6 ist dadurch gekennzeichnet, dass das gemeinsam mit der Turbine gelieferte Spurlager auf dem Turbinendeckel angeordnet ist. In diesem Falle muss natürlich unmittelbar unter dem Generator-Rotorstern ein separates Halslager vorhanden sein. Diese Anordnung hat gewisse Vorteile, insofern als die kleineren radialen Abmessungen eines Halslagers gegenüber denjenigen eines kombinierten Spur- und Halslagers einen

besseren Einbau des Halslagers in den schirmartigen Rotorstern und damit einen kleineren Hebelarm von Rotormitte zu Lagermitte erlauben.

Wenn gleichzeitig das Generator-Halslager als Ölzuführung für den Servomotor zur Kaplan-Turbinen-Laufradverstellung benützt wird, so fällt der obere Ölzuführungsbock über dem Generator weg und man kommt zu einer Gesamtkonzeption wie in Fig. 9 gezeigt. Hier handelt es sich um das Freiluft-Kraftwerk Braunau der Österreichisch-Bayrischen

Kraftwerke, für welches 4 Generatoren mit je 32 MVA, 83/3/224 U./min geliefert wurden. Die Welle ist eingeschwenkt und dann das Polrad aufgesetzt, ohne Pole mit einem Kran von $2 \times 50 = 100$ t, während der komplette Rotor mit Polen 160 t wiegt. Im vorliegenden Falle ist auf der Rotornabe des Generators ein Wellengenerator aufgebaut, welcher die Erreger-Umformer antreibt, während der Pendelgenerator unter dem Generatorführungslager mit Getriebe angetrieben wird.

Eine ähnliche Ausführung wurde für das Kraftwerk Birsfelden gewählt mit 4 Generatoren von je 28,6 MVA und 68,2 U./min.¹⁾ Während bei Brau-

ist nach oben ausbaubar, so dass das Lager für die Revision und den Aus- und Einbau von Segmenten von oben her zugänglich ist. Der grosse Lagerdurchmesser erfordert allerdings, wenn man auf geringen Hebelarm von Mitte Rotorkranz auf Mitte Halslager Wert legt, sehr stark abgekröpften Rotorstern. Zwei derartige Generatoren für 34 MVA, 128/337 U./min sind für das Kraftwerk Barra Bonita in Brasilien im Bau.

Für kleinere Wasserkraft spielt neuerdings die Rohrturbine eine gewisse Rolle. An anderer Stelle wurde hierüber schon ausführlich berichtet. Immerhin sei erwähnt, dass zur Zeit vom Rheinisch-West-

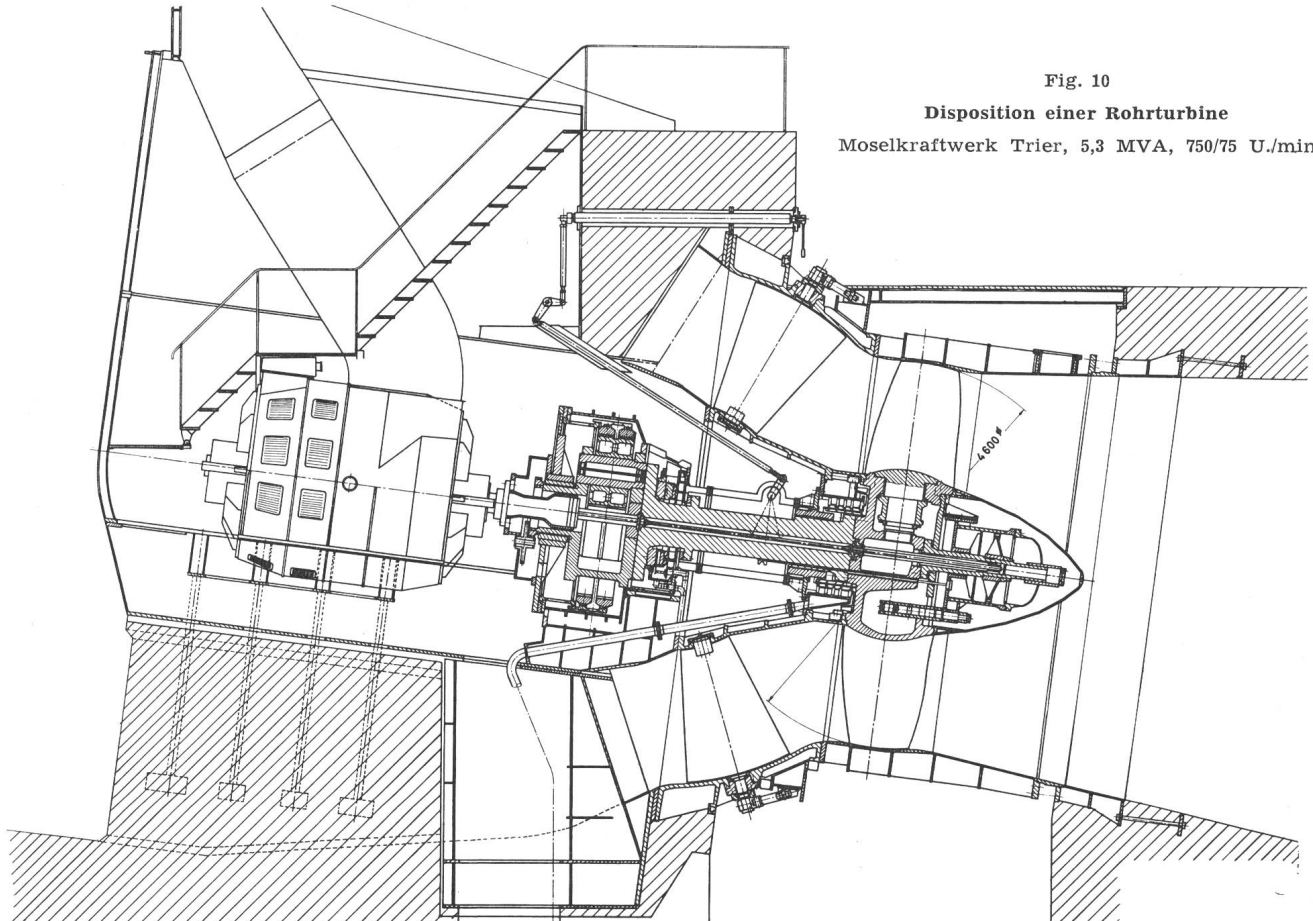


Fig. 10

Disposition einer Rohrturbine
Moselkraftwerk Trier, 5,3 MVA, 750/75 U./min

nau eine einteilige, einschwenkbare Welle verwendet wurde, ist in diesem Falle die Welle über dem auf dem Turbinendeckel sitzenden Spurlager geteilt und ein Öleinführungsbock für den Laufrad-Servomotor am Generator oben aufgebaut. Auch hier wurde ein Wellengenerator verwendet, der den Erreger-Umformer antreibt. Die Erregermaschine des Wellengenerators ist mit dem Pendelgenerator kombiniert und über Getriebe auf der Welle angetrieben.

Eine neuartige Lösung wurde für derartige Schirmgeneratoren entwickelt, bei welcher die Vorteile der Spur- und Halslager-Kombination mit dem Vorteil der direkten Lastübertragung auf dem Turbinendeckel vereinigt sind, indem das kombinierte Lager auf einem rohrartigen Stuhl auf dem Turbinendeckel abgestützt ist. Der Tragkopf des Spurlagers bildet einen Teil der Rotornabe und

fälischen Elektrizitätswerk das Moselkraftwerk Trier als Rohrturbinen-Kraftwerk mit 4 Einheiten erstellt wird (Fig. 9), wobei die Generatoren von 5,3 MVA und 750/2475 U./min über konzentrische Getriebe durch Turbinen mit 75 U./min angetrieben werden.

Es sind noch eine Reihe von Generatorprobleme, welche die Bauweise der Kraftwerke mit beeinflussen, nicht behandelt, wie die Anordnung der Luftführung im Generator und im Maschinenhaus im Zusammenhang mit der Generatorkaufstellung, Kühler- und Kühlwasserprobleme, ganze oder teilweise Frischluft- oder Kreislaufkühlung, die Frage des Einschlusses der Erregermaschine in den geschlossenen Luftkreislauf, maschinenarchitektonische Fragen usw. Es würde aber den gesteckten Rahmen überschreiten, auf alle aktuellen Fragen einzugehen.

Adresse des Autors:

Prof. E. Wiedemann, AG Brown, Boveri & Cie., Baden (AG).

¹⁾ Siele Bull. SEV Bd. 50(1959), Nr. 24, S. 1165...1170.