

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 30 (1939)

Heft: 18

Artikel: Die Maschinentechnik der Wasserkraftanlagen

Autor: Dubs, R.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1060856>

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: 16.01.2026

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

sichtlich in der nächsten Zeit noch ziemlich stark weiter entwickeln. Während früher die massiven, sog. reinen Schwergewichtsmauern das Feld beherrschten, dürften in Zukunft (neben dem Bau von Erddämmen) Material sparende Staumauern, wie Bogenmauern, kombinierte Bogen-Schwergewichtsmauern, Eisenbetonmauern und sog. Hohlmauern vermehrte Anwendung finden. Besonders der letztgenannte Typ, der in der Schweiz erstmals in grossem Ausmass an der Dixence zur Ausführung kam, dürfte inskünftig mehr in den Vordergrund treten, erlaubt er doch gerade bei hohen Staumauern eine erhebliche Materialersparnis bei gleichwohl robustem Charakter des Mauerkörpers. Auch ist dabei das innere Kräftespiel des Mauerkörpers gut zu überblicken. Ferner sind die dauernde Kontrolle und die im Laufe der Zeit evtl. nötig werdenden Ergänzungsarbeiten bei der Hohlmauer leicht durchzuführen. Bei den Bogenstaumauern dürfte die in der Vergangenheit oft angewandte zu theoretische mathematische Behandlung der Spannungsberechnung gelegentlich einer vereinfachten Berechnungsmethode Platz machen, welche ergänzt wird durch Modelluntersuchungen in den baustatischen Laboratorien der technischen Hochschulen. Weiter wird für die künftige Beurteilung und Projektierung von Staumauern aller Typen die Auswertung der inzwischen gesammelten reichen Erfahrungen und Messungen an ausgeführten Staumauern wegleitend sein. So wird gegenwärtig im Auftrage der schweizerischen Talsperrenkommission das grosse Beobachtungs- und Messungsmaterial verschiedener schweizerischer Staumauern einer zusammenfassenden Sichtung und wissenschaftlichen Auswertung unterzogen, deren Resultate für die weitere Entwicklung von Projekt und Bau der Staumauern von Bedeutung sein dürften.

Die mit den Staumauern und Staudämmen Hand in Hand gehenden Entlastungsanlagen (Ueberfallbauwerke und Grundablässe) können ebenfalls mit Hilfe von Modellversuchen in den heute bestehenden Wasserbaulaboratorien rationeller entworfen werden als dies früher der Fall war, so dass gerade für diese sehr wichtigen und oft kostspieligen Bauwerke der Modellversuch für die nächste Zukunft nicht mehr weggedacht werden kann.

Auch die in neuerer Zeit immer besser ausgebauten Untersuchungen und Methoden zur Verdichtung und Verfestigung des Baugrundes werden je länger je mehr bei Staumauern und Staudämmen nützliche Anwendung finden. Hand in Hand damit spielen die Forschungen im Gebiete der Bauchemie

eine wesentliche Rolle, besonders dort, wo es sich um Konsolidierungen und Verfestigungen von wenig tragfähigen Böden handelt, wie dies gerade im Dammbau vorkommt, gelegentlich auch bei Bekämpfung von Durchsickerungen, welche erst im Laufe einer längeren Betriebszeit in Erscheinung treten.

Einlaufbauwerke.

Für die Einlaufbauwerke an Hoch- und Niederdrukwerken haben sich die Bautypen nach und nach weitgehend vereinheitlicht. Sie sind erheblich verbessert worden hinsichtlich Freihaltung der Einlaufbauwerke von Kies und hinsichtlich der ausreichenden Entsandung der eingeleiteten Wassermengen. Die dabei gesammelten Erfahrungen und entwickelten Konstruktionen dürften gelegentlich auch beim Umbau älterer bestehender Werke zur Anwendung gelangen, wie dies bereits an verschiedenen Anlagen geschehen ist.

Zuleitungskanäle und Stollen.

Für die Zuleitungskanäle zu den Kraftwerken, seien es offene Kanäle oder als Stollen gebaute Gerinne, dürften sich die Bauformen und Ausführungsmethoden in der nächsten Zukunft kaum wesentlich verändern. Für die offenen Kanäle, speziell für die dafür nötigen Dammabauten, wird allerdings inskünftig der erdbautechnische Laboratoriumsversuch in vermehrtem Umfang beigezogen werden, um Projekt und Bau tunlichst zu verbessern. Im Druckstollenbau dürfte sich vielleicht das Anwendungsgebiet in gewissen Fällen noch etwas erweitern durch Beziehung der erst seit kurzer Zeit ausgearbeiteten Verfahren zur Vorspannung von Betonkonstruktionen, speziell von ringförmigen Betonbauten. Ferner wird vielleicht noch eine gewisse Verfeinerung der Stollenprojekte zu erwarten sein durch die gegenwärtig in Ausführung befindlichen Messungen und Studien der schweizerischen Druckstosskommission an ausgeführten Kraftwerken. Ein diesbezüglicher Einfluss dürfte sich vor allem auf jene Kraftwerksdispositionen ergeben, bei denen die Wasserschlösser mit gedrosselter Verbindungsöffnung an den Stollen anschliessen und für welche bisher keine zuverlässigen Messresultate vorliegen, die den tatsächlichen Verlauf der Druckstöße von der Druckleitung zum Wasserschloss und Stollen nachgewiesen haben. Es wird für die künftige Entwicklung des Entwurfes von Wasserschlössern von Bedeutung sein, die bisherigen mehr theoretischen Berechnungen durch den bei ähnlichen Fällen tatsächlich gemessenen Druckverlauf nachprüfen zu können.

Die Maschinentechnik der Wasserkraftanlagen.

Von R. Dubs, Zürich, unter Mitarbeit der Industrie.

621.24

Die modernen Ausführungen und künftige Möglichkeiten von Wasserschlössern, Druckleitungen, Turbinen und Turbinenregulierungen werden kurz beschrieben und begründet.

L'auteur décrit et motive les constructions modernes et les possibilités futures en matière de chambres d'équilibre, de conduites forcées, de turbines et de régulateurs.

Das Wasserschloss.

Das am untern Ende des Druckstollens, d. h. beim Beginn der Druckleitung angeordnete Was-

serschloss hat die Aufgabe, die beim Regulieren der Turbinen auftretenden Druckänderungen innerhalb zulässiger Grenzen zu halten. Eine rationelle

Lösung dieser Aufgabe kann durch verschiedene Wasserschlossformen erreicht werden. In der Schweiz sind bis heute hauptsächlich das Schachtwasserschloss (prismatischer Schacht) und das Kammerwasserschloss mit unterer und oberer Kammer zur Anwendung gekommen. Die obere Kammer wird dabei oft mit einem Ueberlauf versehen, um ein zu hohes Ansteigen des Niveaus zu vermeiden und eine konstante Verzögerung der Wasserbewegung im Stollen zu erreichen. In analoger Weise kann auch die untere Kammer für Belastungsverhältnisse mit einer sog. Saugschwelle ausgerüstet werden; es hat diese letzte Bauart jedoch in der Schweiz noch keinen Eingang gefunden.

Die beiden Wasserschlossformen ergeben bei Belastungsänderungen relativ langsam abklingende Niveauschwankungen. Ein rascheres Verschwinden dieser Schwingungen könnte mit einem sog. Differentialwasserschloss, d. h. mit einem Wasserschloss mit innerer und äusserer Kammer, erreicht werden. Diese Bauweise wurde im Ausland schon oft angewendet, nicht aber in der Schweiz.

Eine sehr wichtige Frage ist die Fortpflanzung der Druckstöße von der Druckleitung in den Druckstollen, und da besteht heute die Auffassung, dass bei einem Schacht- oder Kammerwasserschloss sich diese Druckstöße weniger stark in den Stollen fortpropagieren, als bei einem Differentialwasserschloss. Inwieweit diese Auffassung den wirklichen Vorgängen entspricht, werden die umfangreichen Untersuchungen der «Schweizerischen Druckstosskommission» zeigen, und es ist zu erwarten, dass für die zukünftige Ausbildung eines rationellen Wasserschlusses wertvolle Unterlagen erhalten werden.

Die Druckleitung.

Die an das Wasserschloss anschliessende Druckleitung geht vorerst meistens in nahezu horizontaler Lage zu einer in der Nähe des Wasserschlusses gelegenen Apparatenkammer, in welcher Abschlusschieber oder Drosselklappen sowie beinahe stets ein automatischer Rohrabschluss untergebracht sind. Während die Schieber oder Drosselklappen dazu dienen, ohne Entleerung des Stollens die Druckleitung wasserfrei zu erhalten, soll der automatische Rohrabschluss dann in Funktion treten, wenn infolge eines Bruches der Rohrleitung (oder der Rohrleitungen) ein abnormal grosser Wasserdurchfluss eintritt. Die Betätigung des automatischen Rohrabschlusses erfolgte bis in die letzte Zeit durch ein sog. Staupendel, dessen eine gewisse Grenze überschreitender Staudruck die Schliessbewegung einleitete¹⁾. Man empfand diese Art der Betätigung allerdings schon lange als mangelhaft; denn solange die totale Wassermenge in der Druckleitung die maximale für den Betrieb der Turbinen nötige Menge nicht überschreitet, tritt der automa-

¹⁾ Die Konstruktion dieser «hydraulischen Pendelauslösers» wurde hauptsächlich von den L. von Rollschens Eisenwerken in der Klus sehr weitgehend verfolgt, wobei insbesondere dem Umstand grosse Beachtung geschenkt wurde, dass Apparate, welche nur selten in Tätigkeit treten müssen (d. h. automatische Rohrabschlüsse), die Neigung haben, im Momente ihrer Beanspruchung zu versagen.

tische Rohrabschluss nicht in Tätigkeit, auch wenn in der Druckleitung Risse und damit Wasserverluste vorhanden sind²⁾. Dieser Mangel konnte auch nicht durch eine elektrische oder hydraulische Fernauslösung behoben werden; denn bei zugedeckten Druckleitungen sind kleinere Leckverluste überhaupt nicht sichtbar, und bei offen verlegten Leitungen, ohne besondere Beleuchtung, auch nur während der Tageshelle. Auf der Suche nach einer besseren Lösung des Rohrschutzes kam man auf den Gedanken, die Wassermengendifferenz beim Eintreten in die Rohrleitung und beim Austritt aus der Rohrleitung (Turbinen) als Indikator für die Betätigung des automatischen Rohrabschlusses zu verwenden. Wenn keine Leckverluste vorhanden sind, so ist diese Differenz gleich Null und der Rohrabschluss tritt, wie dies auch sein soll, nur in Tätigkeit, wenn Leckverluste von einer bestimmten Grösse eintreten. Man kommt so zu einer Konstruktion, die als «Differential-Rohrschutz» bezeichnet wird, und die wohl in Zukunft allgemeiner verwendet werden dürfte. Beim Etzelwerk ist ein solcher Differential-Rohrschutz, m. W. zum ersten Male durch Anwendung von zwei Venturimetern zur Ausführung gekommen, wobei mit einem Differentialrelais, das auf eine Differenz in der Wassermengenangabe der Venturimeter anspricht, die Steuerung des Rohrabschlusses erfolgt. Diese, in jeder Beziehung sehr weitgehend ausgebaute Rohrbruchsicherung wurde ausgeführt von den Firmen Escher Wyss und Gebrüder Sulzer in Zusammenarbeit mit der Firma Siemens, die insbesondere den sehr gut ausgedachten elektrischen Teil bearbeitete. Die mit dieser neuartigen Rohrbruchsicherung durchgeführten Versuche haben ein sehr gutes Ergebnis gezeigt, wie überhaupt gesagt werden darf, dass im Etzelwerk die letzten Fortschritte der Technik Anwendung fanden und sich bewährten.

Eine weitere, auf die eingangs erwähnten Gesichtspunkte Rücksicht nehmende Lösung des «Rohrschutzes» wurde von Charmilles im Kraftwerk Dixence angewendet. Es wird dort von der Turbinenregulierung die Auslösung der Schutzklappe entsprechend der Belastung der Turbine in der Weise gesteuert, dass die Klappe schliesst, sobald die Wassergeschwindigkeit oben wesentlich grösser ist, als dem Wasserkonsum der Turbine entspricht.

Als Abschlussorgan für die Rohrleitungs- und Maschinenhaussicherung wird meistens eine Drosselklappe verwendet, deren Konstruktion durch die Forschungsarbeiten³⁾ wesentlich verbessert wurde, wobei die Klappe strömungstechnisch besser ausgebildet und meistens in geschweisster Stahlkonstruktion ausgeführt wird (Fig. 1). Auch an Stelle des hydraulischen Pendelauslösers, der trotz sorgfältiger Konstruktion doch noch Anlass zu unliebsamen Betriebsstörungen geben kann, ist man in letzter Zeit manchmal dazu übergegangen, die Niveau-differenz zwischen Wasserschloss und einer

²⁾ Siehe auch: «Rohrbruchsicherungen» von O. Schnyder, Schweiz. Bauztg., Bd. 107, Nr. 25, vom 20. Juni 1936.

³⁾ Siehe auch: «Untersuchungen an Drosselklappen» von C. Keller, Schweiz. Bauztg. vom 25. März 1936.

Rohrabschlußstelle in der Apparatenkammer als Indikator für den automatischen Rohrabschluss zu verwenden (Ausführung von Escher Wyss für die Anlage Campocologno der Kraftwerke Brusio).

Die Druckleitungen selbst werden heute beinahe ausnahmslos aus Stahl ausgeführt; die früher gebräuchliche Nietverbindung und Wasserstoffgas-Schweissung wurde weitgehend durch die elektrische Schweissung ersetzt, wobei man bestrebt war, durch Verbesserungen der Schweissmethoden und durch Wahl eines weichen Rohrmaterials sowie zweckmässiger Elektroden die Güte der Schweissverbindung auf ein Maximum zu bringen. Auch die Kontrolle des Materials und der Schweissverbindung wurde wesentlich verbessert, so dass die Betriebssicherheit einer geschweissten Rohrleitung nicht mehr hinter der einer genieteten zurückstehen dürfte. Bei für Schweissverbindungen zu grossen Wandstärken (> 60 mm) kommen bandagierte Rohre zur Anwendung (Achensee, Handeck usw.), wenn aus Dimensionsgründen keine nahtlos gewalzten Rohre verwendet werden können. Mit Rücksicht auf die kleinere relative Rauhigkeit und damit, bei sonst gleichen Verhältnissen, kleineren Druckverlusten ist den geschweissten Rohrleitungen gegenüber den genieteten der Vorzug zu geben.

Die in jeder Druckleitung vorkommenden Abzweig- und Verteilstücke bereiteten sowohl strömungs- als auch festigkeitstechnisch stets gewisse Schwierigkeiten. Waren sie strömungstechnisch gut ausgebildet, so wurden sie festigkeitstechnisch sehr



Fig. 1.
Drosselklappe.
(Escher-Wyss.)

ungünstig und umgekehrt. Man behielt sich deshalb bisher mit einem gewissen Kompromiss und stellte in den letzten Jahren das Strömungstechnische mehr in den Vordergrund. Bei Verteilstücken und sog. Hosenrohren wurde dann durch Anbringen von Versteifungsstegen (Kragen) die Festigkeitsfrage gelöst, wobei allerdings das ästhetische Moment

manchmal etwas zu kurz kam (Fig. 2). Für die festigkeitstechnische Lösung dieses Problems hat sich insbesondere die Firma Gebrüder Sulzer in Winterthur bemüht⁴⁾ («Sulzerkrallen»). Von dieser Firma wurde auch die Schweissung der Druck-

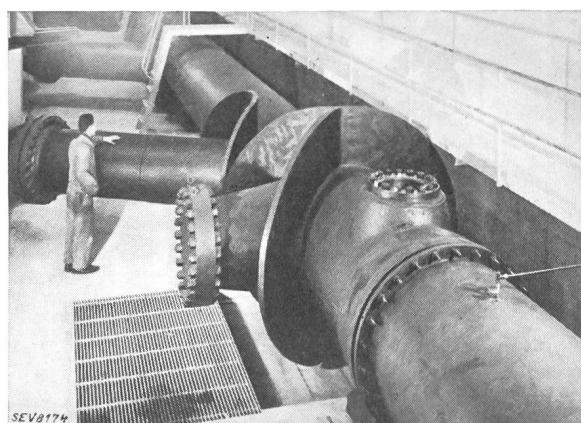


Fig. 2.
Sulzerkrallen.

leitungen in schraubenförmiger (Spiralnaht) anstatt der geraden Längsnaht eingeführt, wobei ungefähr die Festigkeit nahtloser Rohre erreicht wird.

Die Turbinen.

Für die Wahl des Turbinentyps ist das ausnutzbare Gefälle H sowie die spezifische Drehzahl n_s bestimmend. Bei Gefällen von $H = 500$ und mehr Meter kann auch heute noch und vermutlich ebenso für die Zukunft nur eine Freistrahlturbine in Frage kommen. Bei Gefällen von 200 bis 500 m ist die spezifische Drehzahl für die Systemwahl bestimmend, und unter 200 m Gefälle kommt meistens nur noch die Francisturbine oder dann eine Kaplan-turbine in Frage.

Die Freistrahlturbine kann grundsätzlich für alle Gefälle angewendet werden; allein es sind hier gewisse wirtschaftliche Grenzen gesetzt. Bei zu kleinen Gefällen wird die Freihanghöhe relativ zu gross und damit die Ausnutzung des zur Verfügung stehenden Gefälles ungünstig. Da die spezifische Drehzahl

$$n_s = \frac{n \cdot \sqrt{P_t}}{H \cdot \sqrt{H}}$$

der eindüsigen Freistrahlturbine den Wert 35 bis 37 nicht überschreiten darf, wenn ein guter Wirkungsgrad bei Vollast erreicht werden soll, so ist man zwecks Erzielung einer genügend hohen Drehzahl bei kleinen Gefällen ferner gezwungen, zur mehrdüsigen Freistrahlturbine zu greifen, um den Anschluss an die rascherlaufende Francisturbine zu finden. Als unterste Grenze für die rationelle Ausnutzung der Freistrahlturbine ist etwa ein Gefälle von $H = 200$ m zu betrachten. Eine oberste Grenze für die Freistrahlturbine kann kaum angegeben werden, sofern es gelingt, die jetzt noch infolge Tropfenschlag und Cavitation auftretenden

⁴⁾ Siehe auch: Rev. techn. Sulzer 1937, Nr. 1.

Schaufelzerstörungen zu vermeiden. Diese Zerstörungen treten nämlich, unter sonst gleichen Verhältnissen, d. h. bei gleichem $K_{u1} = \frac{u_1}{\sqrt{2gh}}$ und gleichem $m = \frac{D_1}{d_1}$ sowie gleicher Schaufelkonstruktion, um so intensiver auf, je grösser das Gefälle ist.

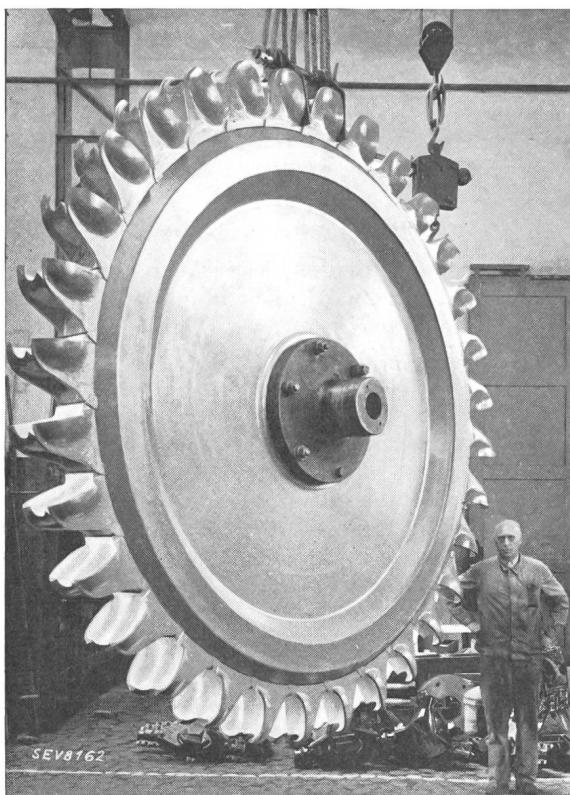


Fig. 3.
Laufrad der Turbinen im Dixencewerk.
(Charmilles)

Eine weitere Schwierigkeit bereitet bei sehr hohen Gefällen die sichere Befestigung der Schaufeln und die Festigkeit der Schaufel selbst. Bei einem Gefälle von z. B. $H = 2500$ m würde bei Leerlauf die Umfangsgeschwindigkeit auf 200 m/s ansteigen und bei 100 kg Schaufelgewicht und 2 m Raddurchmesser eine Fliehkraft von $F = 400\,000$ kg, d. h. 400 Tonnen pro Schaufel entstehen, deren Ueberwindung erhebliche konstruktive Schwierigkeiten bereiten dürften. Fig. 3 zeigt z. B. ein Freistrahlrad der Turbinen des Dixence-Werkes (zwei pro Generator) für $H = 1750$ m und $P = 15\,700$ kW.

Die Francisturbine ist in ihrer Anwendungsmöglichkeit ausserordentlich vielseitig. Eine untere Gefällsgrenze ist lediglich, ähnlich wie bei der Freistrahlтурbine, durch die Wirtschaftlichkeit gezogen: zu kleine Drehzahlen bei einer gegebenen Wassermenge und gegebenem Gefälle, während die obere Gefällsgrenze durch das Auftreten von Cavitation gegeben ist. Es ist allerdings auch hier möglich, gleich vorzugehen, wie man es bei der Kaplanturbine getan hat, d. h. durch Tiefersetzen des Laufrades (Arbeiten unter Gegendruck) das Auftreten von Cavitation zu vermeiden. Eine Francisturbine, die mit Gegendruck arbeitet, wurde bei 350 m Ge-

fälle von Escher Wyss im Veltlin aufgestellt. Ausser dem Gefälle ist auch bei der Francisturbine die Grösse der spez. Drehzahl für die Anwendungsmöglichkeit bestimmend. Als unterste Grenze kann heute ein $n_s \sim 50$ und als oberste Grenze $n_s \sim 300$ betrachtet werden. Die oberste Gefällsgrenze für eine wirtschaftliche Anwendungsmöglichkeit der Francisturbine dürfte unter günstigen Verhältnissen bei $H = 500$ m liegen.

Bemerkenswert ist, dass mit der Francisturbine sehr grosse Radleistungen erzielt werden können; so besitzt z. B. das Laufrad einer der drei von der Escher Wyss A.-G. für das Kraftwerk Sungari in Japan zu liefernden Turbinen eine Leistung von 85 000 kW bei 69 m Gefälle und 125 Umdr./min, was eine spez. Drehzahl $n_s = 212$ ergibt (Fig. 4). Obwohl dies die grösste bisher in Europa erzielte Radleistung sein dürfte, ist damit die Grenze des Francisrades noch lange nicht erreicht.

Die Kaplanturbine ist die für die Ausnützung von kleinen und mittleren Gefällen wohl zweckmässigste Wasserkraftmaschine. Infolge der Verdrehung der Laufradschaufeln, die einigermassen synchron mit der Verdrehung der Leitadschaufeln erfolgt, wurde es möglich, auf sehr weitem Bereich der von der Turbine ausgenützten Wassermenge einen hohen und nahezu konstanten Wirkungsgrad zu erzielen. Kaplanturbinen mit feststehenden Laufradschaufeln werden als Propellerturbinen bezeichnet und kommen heute relativ selten zur Anwendung, da ihr Wirkungsgrad bei abnehmender Wassermenge stark abfällt. Noch mehr als die Francisturbine lässt sich die Kaplanturbine für die rationelle Ausnützung kleinsten Gefälle verwenden; denn sie besitzt eine höhere spez. Drehzahl und gestattet deshalb, bei sonst gleichen Verhältnissen, das Erreichen einer höheren Drehzahl als die Francisturbine. Die spez. Drehzahlen der Kaplanturbine bewegen sich in den Grenzen $n_s = 300$ bis 1000, wobei der kleinste Wert

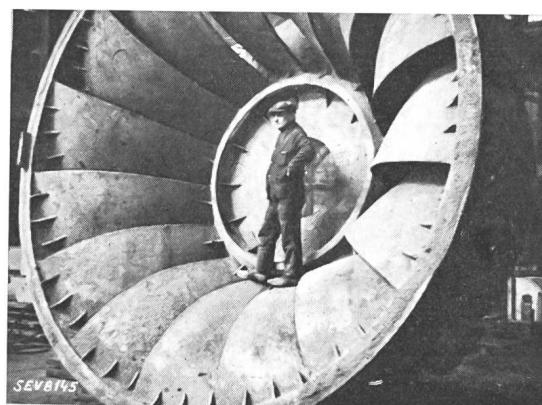


Fig. 4.
Laufrad für das Kraftwerk Sungari (unverputzt).
(Escher-Wyss.)

für das höchste Gefälle und der höchste Wert für das kleinste Gefälle anzunehmen ist. Als Gefällsgrenzen für die Anwendung der Kaplanturbine kann $H = 2$ bis 50 m angenommen werden, wobei $H = 50$ m schon einen Blick in die Zukunft bedeutet; denn man hat heute noch keine Kaplantur-

binen für $H = 40$ m Gefälle gebaut und es liegen nur Projekte für eine Ausnützung von $H = 45$ m Gefälle vor. Die Schwierigkeit in der Ausnützung höherer Gefälle mit der Kaplanturbine liegt auch hier, wie bei der Francisturbine, in der Cavitationserscheinung, die nach neueren Forschungen nicht allein durch die Dampfspannung, sondern auch durch den Luftgehalt des Betriebswassers bedingt wird. Es ist auch hier möglich, durch entsprechendes Tieferlegen des Laufrades unter den Unterwasserspiegel, d. h. durch Gegendruck, bei hohen Gefällen das Auftreten der Cavitation zu vermeiden, und man hat diesen Weg beim Kraftwerk Wettigen mit Erfolg beschritten. Je höher jedoch das Gefälle ist, um so kleiner muss die spez. Drehzahl gewählt werden und um so tiefer ist das Laufrad zu legen, wenn die Cavitation mit ihren Begleiterscheinungen (Wirkungsgrad und Leistungsverlust sowie Materialzerstörungen) verhütet werden soll. Da unter dem Laufrad das Saugrohr angeordnet ist, welches gerade bei Kaplanturbinen einen integrierenden Bestandteil der Turbine bildet, wenn ein guter Wirkungsgrad erreicht werden soll, so ist man bei unter dem Unterwasserspiegel liegendem Laufrad gezwungen, mit den Baugruben sehr tief zu gehen, was infolge der oft schwierigen Wasserhaltung meistens mit grossen Kosten verbunden ist. Durch diese Umstände dürfte auf Grund wirtschaftlicher Ueberlegungen die oberste Gefällsgrenze für die Anwendung der Kaplanturbine bei etwa $H = 50$ m liegen. Dies gilt auch für die Propellerturbine gleicher Schnellläufigkeit, da diese dann die gleiche relative Schaufellänge wie das Kaplanlaufrad besitzt und die relative Schaufellänge ein Kriterium für das Auftreten der Cavitation ist.

Fig. 5 zeigt ein Kaplanlaufrad mit einer der Firma Bell in Kriens patentierten Vorrichtung, die

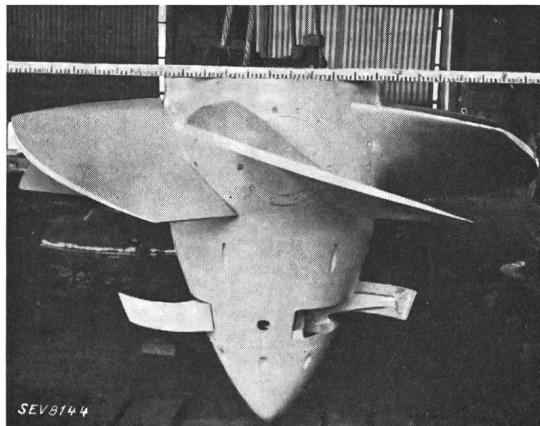


Fig. 5.
Kaplanrad mit Vorrichtung gegen hohe Durchgangsdrehzahlen.
(Bell.)

zur Verminderung der Durchgangsdrehzahl dienen soll.

Die Diagonalturbine⁵⁾ eignet sich in hervorragender Weise zur Steigerung der Leistung alter

⁵⁾ Siehe auch: «Vergleich verschiedener Schnellläuferturbinen und Vorschlag zu einem neuen Typ», von W. Zuppinger, Schweiz. Bauztg., Bd. 66 (1915), Nr. 17, S. 196.

Kraftwerke, deren Kammern aus baulichen Gründen nicht vergrössert werden können. Es soll hier insbesondere auf die gelungenen Umbauten in den Werken Ruppoldingen und Beznau hingewiesen werden. Dem Diagonalleitrad kann sowohl ein Francisschnellläuferrad als auch ein Kaplan- oder Propellerrad zugeordnet werden, und die Leitrad-schaufeln brauchen nicht drehbar zu sein, wenn die Laufradschaufeln drehbar sind, da diese dann die Leistungsregulierung übernehmen können, wobei auch bei Teillast ein guter Wirkungsgrad erreichbar ist.

Zukünftig wird bei Umbauten alter Kraftwerke die Diagonalturbine wohl vermehrte Anwendung finden.

Die Turbinenregulierungen.

Die Veränderung der Wassermenge und damit auch der Leistung wird auch heute noch bei Freistrahlturbinen durch eine sog. Nadeldüse und bei Francis- und Kaplanturbinen durch ein Leitrad mit Finkschen Drehschaufeln bewirkt. Mit diesen einfachen Regulierorganen ist es möglich, den Wirkungsgrad innerhalb grosser Wassermengenänderungen beinahe konstant und relativ hochzuhalten. Damit bei raschen Belastungen und Entlastungen die Drehzahl sich wenig ändert, müssen die Regulierorgane entsprechend rasch bewegt werden, denn es gilt für diese nichtstationären Vorgänge die Beziehung:

$$J \cdot \frac{d\omega}{dt} = M_a - M_w$$

wo:

J das Massenträgheitsmoment der rotierenden Massen,
 ω die Winkelgeschwindigkeit,
 M_a das antreibende Moment, und
 M_w das widerstehende Moment

bedeutet. Bei einer plötzlichen Vollentlastung ist z. B. $M_w = 0$ und man erhält:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{M_a}{J} = \frac{L_a}{\omega \cdot J}$$

und da

$$L_a = \frac{P_{t_0}}{75} \quad \text{und} \quad \omega = \frac{\pi \cdot n_0}{30}$$

so folgt:

$$\left| \frac{d\omega}{dt} \right|_{t=0} = \frac{P_{t_0} \cdot 30}{J \cdot 75 \cdot \pi \cdot n_0} = \frac{K \cdot P_{t_0}}{J \cdot n_0}$$

woraus zu erkennen ist, dass die Drehzahl im ersten Moment der Entlastung um so schärfer ansteigt, je grösser die Turbinenleistung P_{t_0} und je kleiner die normale Drehzahl n_0 und das Massenträgheitsmoment J der rotierenden Massen ist. Die maximale Drehzahlerhöhung δ ist, außer von obigen Grössen, noch von der Schliesszeit T_s der Absperrorgane abhängig. Man erhält näherungsweise

$$\delta = \frac{135\,000 \cdot P_{t_0} \cdot T_s}{n_0^2 \cdot G \cdot D^2}$$

worin:

$$\delta = \frac{\omega_{\max} - \omega_0}{\omega_0}$$

und

$$G \cdot D^2 = 4 \cdot g \cdot J$$

Damit δ klein wird, muss, bei sonst gleichen Verhältnissen, die Schliesszeit T_s oder die Oeffnungszeit T_δ klein sein. Da nun aber das Wasser in den Zu- und Ableitungen der Turbine vor dem Reguliervorgang eine bestimmte Geschwindigkeit besitzt, so wird diese Geschwindigkeit durch die Betätigung des Regulierorganes in kurzer Zeit verändert, was, wenn nicht besondere Zusatzapparate (Druckregler, Ablenker) vorhanden sind, grosse relative Druckänderungen an der Regulierstelle mit sich bringt, die rückwärts wieder die Drehzahlschwankungen beeinflussen. Um solche Druckänderungen, die bei langen Leitungen gefährliche Werte erreichen könnten, zu verhüten, werden die Freistrahlturbinen mit Ablenker-Doppelregulierungen und die Francis- und eventuell später auch Kaplan-turbinen mit Druckreglern ausgerüstet. Bei Niederdruckanlagen ohne besondere Zuleitung, aber mit im Verhältnis zum Gefälle langen Saugrohren (Kaplan-turbinen) wirkt sich die Massenwirkung des im Saugrohr instationär fliessenden Wassers durch relativ starke Druckänderungen auf den Reguliervorgang, d. h. die Drehzahlschwankung, aus. Man hat hier versucht, durch gesteuerte Lufteinlässe, die Luft in den Schaufelspalt einlassen, diesen Erscheinungen zu begegnen.

Es war von jeher das Bemühen der Regulatorkonstrukteure, durch besondere Massnahmen einen aperiodischen, d. h. schwingungsfreien Uebergang von der Drehzahl vor der Belastungsänderung auf die Drehzahl nach der Belastungsänderung zu erzielen. Die zur Erreichung dieses Ziels geschaffene starre und elastische Rückführung hat in den letzten Jahren verschiedene Verbesserungen und Ergänzungen erfahren, so dass schliesslich ein automatischer Turbinenregulator entstand, der hochgestellte Ansprüche befriedigen konnte. Eine grundsätzliche Schwäche haftet allerdings diesem Regulator immer noch an, denn sein Indikator ist ein Fliehkraftpendel, d. h. es muss eine Drehzahlveränderung eingetreten sein, bevor der Regulator in Tätigkeit tritt und bestrebt ist, die Drehzahl konstant zu halten. Er wird also durch die *Wirkung* gesteuert und nicht durch die *Ursache*, und deshalb kommt er grundsätzlich immer zu spät. Durch besondere Konstruktionen wurde allerdings die Empfindlichkeit des Regulators so gesteigert, dass der obenerwähnte Mangel bei einem modernen Turbinenregler praktisch keine Rolle mehr spielt. Nichtsdestoweniger waren die Regulatorkonstrukteure doch weiter bestrebt, den Regulator zu verbessern, und so entstand das *Beschleunigungspendel*, bei dem nicht die Geschwindigkeit (ω) als solche, sondern die Tangente an die Geschwindigkeitskurve ($\frac{d\omega}{dt}$) als Indikator zur Betätigung des Regulators verwendet wird⁶⁾. In der Weiterentwicklung des Antriebes des Fliehkraftpendels kam man vom Riemenantrieb zum starren Antrieb, der aber nicht immer befriedigende Resultate er-

⁶⁾ Siehe auch: Escher-Wyss-Mitt. 1929, H. 6, sowie die Konstruktion des Regulators der Ateliers des Charmilles.

gab, und schliesslich zum direkten Antrieb mit Synchronmotoren, die zum Teil direkt vom Hauptgenerator oder über spezielle Generatoren ihre elektrische Energie erhalten⁷⁾.

Die besonders in den letzten Jahren sich stark entwickelnde Hochfrequenz- und Verstärkertechnik liess den Gedanken auftauchen, die Netzfrequenz direkt zur Steuerung des Regulators zu verwenden, und so entstand in Zusammenarbeit zwischen Regulatorkonstrukteuren und den Fachleuten des elektrischen Gebietes der Drehzahlregler mit Frequenzmeßsystem oder kurz der «Frequenzregler», dessen Arbeitsweise im folgenden kurz beschrieben werden soll.

Durch eingehende Versuche konnten die Verstellkräfte von Frequenz-Meßsystemen derart verstärkt werden, dass sie zur Verstellung von Steuerorganen ausreichten. Das Frequenz-Messorgan erhält den Strom vom Generator, in besonderen Fällen auch von einer speziellen Dynamo, die von der Turbine aus starr angetrieben wird. Ein solcher Frequenzregler arbeitet im Prinzip mit zwei elektrischen Schwingungskreisen, wobei der eine Stromkreis einen rein induktiven, der andere dagegen einen kapazitiven Charakter hat. Damit wird erreicht, dass bei der geringsten Abweichung der Frequenz vom eingestellten Nennwert das resultierende Drehmoment stark ansteigt. Ein Regler dieser Art arbeitet bis zu sehr tiefen Spannungen. Diese Frequenz-Meßsysteme haben vollkommen astatischen Charakter. Sie können aber ebenfalls auf jeden be-

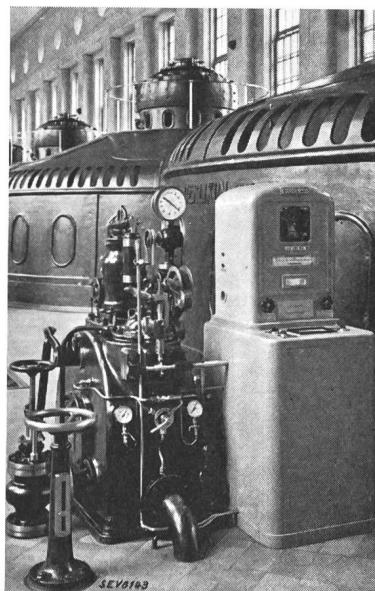


Fig. 6.
Pendelregler (links) und Frequenzregler (rechts).
(Escher Wyss und Maschinenfabrik Oerlikon.)

liebigen Statikwert eingestellt werden, wie dies heute bei den mechanischen Fliehkraft-Pendelreglern noch üblich ist. Zur Einstellung des gewünschten Nennwertes der Frequenz dient eine regulierbare Drosselspule. Jeder Stellung des Ankers dieser Drosselspule entspricht ein bestimmter Frequenz-

⁷⁾ Antrieb beim Etzelwerk.

wert. Diese Einrichtung hat den Vorteil, dass keine beweglichen Kontakte vorhanden sind. — Als Vorteil darf noch angeführt werden, dass ein solcher elektrischer Regler keine dauernd rotierenden Teile besitzt und dass das oftmals recht komplizierte Verbindungsgetriebe von der Turbinenwelle zum Fliehkraftpendel dahinfällt. — Es wird aber noch eine Sache der Zeit sein, das Frequenz-Meßsystem derart auszubilden, dass es auch in bezug auf die Betriebssicherheit dem Fliehkraftpendelregler ebenbürtig wird.

Die Frequenz-Meßsysteme, die den eigentlichen Steuerimpuls einleiten, wurden von den einzelnen Firmen nach eigenen Grundsätzen aufgebaut und ausprobiert. Dieses elektrische Steuersystem bringt bereits auch schon neue interessante Probleme für den Elektriker, so die kombinierte Leistungs- und Frequenzregulierung⁸⁾.

In der Entwicklung dieses neuen Reglers haben sich besonders Brown Boveri in Baden, die im Juni 1937 einen ersten solchen Regler im Elektrizitäts-

werk Aarau mit vollem Erfolg in Betrieb setzten, und die Maschinenfabrik Oerlikon verdient gemacht, welche letztere in Verbindung mit Escher Wyss im Kraftwerk Eglisau einen solchen Regler aufstellte, der dort, neben dem früheren Regulator, seit einiger Zeit mit gutem Erfolg im Betrieb steht. Fig. 6 zeigt die beiden Regulatoren nebeneinander, wobei links der alte Pendelregler und rechts der neue Frequenzregler steht.

Wenn der neue Frequenzregler mit für alle Fälle genügender Betriebssicherheit gebaut werden kann und seine Kosten innerhalb eines zulässigen Rahmens bleiben, so ist er vielleicht berufen, den jetzigen Pendelregler in Zukunft zu ersetzen, womit wieder ein Schritt vorwärts in der Entwicklung des automatischen Regulators getan wäre.

⁸⁾ Siehe auch: Bericht über die Diskussionsversammlung des SEV vom 1. Mai 1939 über «Frequenz- und Leistungsregulierung in grossen Netzverbänden», Bull. SEV 1937, Nr. 22; ferner «Un nouveau régulateur de vitesse», Bulletin SEV 1939, Nr. 1, sowie: Brown-Boveri-Mitt. 1939, Nr. 6.

Thermische Erzeugung als Ergänzung zur hydraulischen Erzeugung.

Von Ad. Meyer, Baden.

621.311.22

Die Frage des Baues von Ergänzungs- und Reservekraftwerken mit thermischen Primärmaschinen in der Schweiz wird von den verschiedenen Gesichtspunkten aus beleuchtet. Heute engen die wirtschaftspolitischen und kriegswirtschaftlichen Verhältnisse den Bau thermischer Grosskraftwerke in der Schweiz ein. Aber gerade diese selben Umstände führen zum Bau kleinerer thermischer Werke, die bombensichere ausgeführt werden. Hiezu stehen unsere Weltruf geniesseenden thermischen Primärmaschinen zur Verfügung. Die Wahl der Art der Primärmotoren wird gestreift. Drei Beispiele sind aufgeführt.

L'auteur étudie sous ses différents aspects la question de la construction en Suisse d'usines électriques de pointe ou de réserve à moteurs primaires thermiques. Aujourd'hui, des considérations d'ordre politico-économique et militaire empêchent plus ou moins de construire des grandes usines thermiques en Suisse. Ces mêmes considérations conduisent toutefois à la construction de petites usines thermiques à l'abri des bombes. Pour ces usines notre industrie produit des machines thermiques primaires de renommée mondiale. L'auteur esquisse quelques considérations au sujet du choix des types de moteurs primaires et donne trois exemples d'exécution.

Die Aussichten für die Erzeugung von elektrischer Energie für Reservezwecke oder zum teilweisen Ausgleich zwischen Sommer- und Winter-Energieproduktion durch thermische Kraftmaschinen in der Schweiz sind stark von kriegswirtschaftlichen Gesichtspunkten abhängig. Wären hierfür nur die Friedenszeit und deren freie wirtschaftliche Bedingungen massgebend, so würden wir Thermodynamiker dem Wärmekraftwerk auch in der Schweiz für die Zukunft eine bedeutende Entwicklung voraussagen, denn erstens werden die ausbauwürdigen Speicherwerke, deren wir zur Ergänzung unserer Laufwerke bedürfen, immer seltener und teurer, die thermischen Werke aber billiger; zweitens haben wir eine Anzahl von schweizerischen Unternehmungen, die thermische Kraftmaschinen bauen, welche mit Recht Weltruf geniessen.

Die Frage des Brennstoffbezuges aus dem Ausland wäre unseres Erachtens in Friedenszeiten kein Hinderungsgrund. Da wir Schweizer exportieren müssen, um unser Volk ernähren zu können, und unsern recht hohen Lebensstandard aufrecht zu halten, müssen wir auch importieren, damit unsere Ausfuhr bezahlt werden kann. Nie ist das wohl jedem Einzelnen so klar zum Bewusstsein gekom-

men, wie in der heutigen Zeit der künstlichen Beschränkungen des Handels durch Aus- und Einfuhrverbote, Kontingentierungen, Tauschverpflichtungen, Clearing, und wie sie alle heißen. Wie wären gerade die Erbauer thermischer Maschinen, die völlig auf den Auslandsmarkt angewiesen sind, froh, wenn die Ausfuhr hochwertiger Produkte mit Kohle oder Öl kompensiert werden könnte. Die Einfuhr von Brennstoffen für thermische Kraftmaschinen würde auch im Gegensatz zu fast allen andern Kompensationsartikeln keinen Inländer be nachteiligen, kommen doch die einzigen schweizerischen Brennstoffe, Holz und Torf, kaum für die Krafterzeugung in Frage. Aber wenn wir auch alle wünschen und hoffen, dass wieder einmal Zeiten kommen mögen, wo der Wahnsinn Krieg nicht mehr alle, auch die friedlichsten Handlungen überschattet, so müssen wir uns wohl als Realisten und Techniker damit abfinden, dass das Kriegsgespenst in der nahen Zukunft die Aussichten für die Erzeugung elektrischer Energie durch thermische Kraftwerke stark einengt.

Es ist anderseits interessant, zu sehen, dass gerade die Rücksichten auf den Krieg, die, wie gezeigt, den Bau von thermischen Werken zur Er-