

Die hydraulischen Maschinen

Autor(en): **Gerber, Hans**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Wasser- und Energiewirtschaft = Cours d'eau et énergie**

Band (Jahr): **52 (1960)**

Heft 5-6

PDF erstellt am: **14.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-921742>

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.

Die hydraulischen Maschinen

Prof. Hans Gerber, ETH, Zürich

DK 621.24

Es liegt auf der Hand, daß zwischen der Tätigkeit des Schweizerischen Wasserwirtschaftsverbandes in den nun 50 Jahren seines Bestehens und der Entwicklung im Bau hydraulischer Maschinen und ihrer Zusatzorgane ein enger Zusammenhang bestehen muß, der weniger organisatorisch begründet und gelenkt war, als sich in selbstverständlicher Weise aus gegenseitiger Anregung ergab. Die Schweizerische Wasserwirtschaft, soweit es wenigstens den Kraftwerkbau betrifft, hätte sich kaum in dieser umfassenden Weise entwickeln können, wenn nicht die Maschinenindustrie immer stärkere, bessere und sicherere Maschinen und Einrichtungen zu liefern in der Lage gewesen wäre. Umgekehrt jedoch ist es klar, daß es für eine Industrie von unschätzbarem Wert ist, wenn in nächster Nähe, im eigenen Land, jederzeit die Möglichkeit und die Unternehmungslust besteht, alles Neue auszuführen und anzuwenden und es so der zuverlässigsten Prüfung, der täglichen Bewährungsprobe im Dauerbetrieb zu unterwerfen.

Es soll deshalb im folgenden versucht werden, zu zeigen, welche Maschinen zur Zeit der Gründung des SWV der Wasserkraftnutzung zur Verfügung standen, und wie sie sich zu ihrem heutigen Stand entwickelt haben. Dabei soll die Betrachtung auf in der Schweiz gebaute und in Schweizer Kraftwerken aufgestellte Maschinen beschränkt werden.

A. Der Stand um 1910

Schaut man beispielsweise die Liste des «Führers durch die Schweiz. Wasserwirtschaft» durch, so sieht man, daß erst 10 Jahre nach Beginn dieser Statistik, d. h. 1896, die Gesamtleistung der neuerstellten Werke die

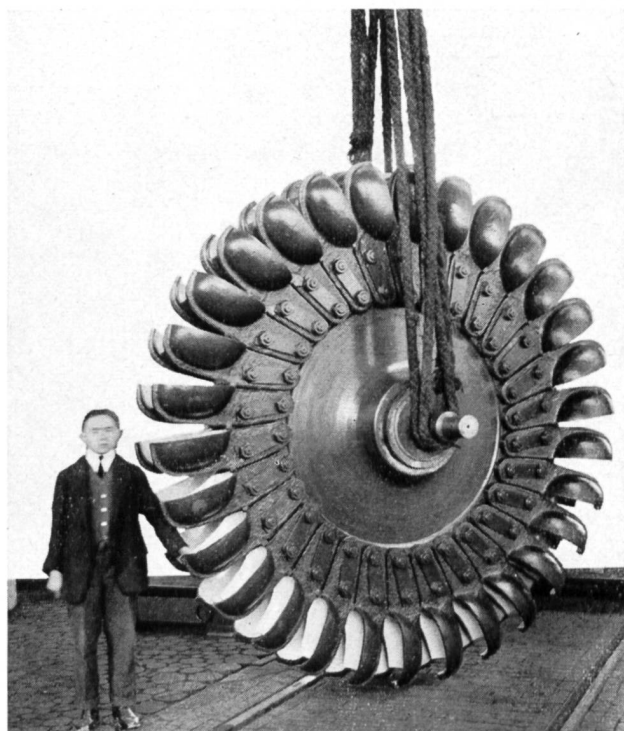


Bild 1 Mehrteiliges Peltonrad mit einzeln aufgeschraubten Bechern und Querkeilen für das Kraftwerk Kandergrund; 4350 PS, H etwa 300 m (1910)
Photo Charmilles

10 000 PS-Grenze überschritt, eine Leistung, die heute als nur mittlere Maschinenleistung einer Turbine allein bezeichnet werden muß. Erst 1908 stieg diese totale Neubauleistung sprunghaft auf 86 000 PS, das Doppelte des Vorjahres.

Rund 40 % davon gingen allein auf das Navizenze-Werk in Chippis, wo 11 Hauptturbinen unter einem Bruttogefälle von fast 600 m arbeiteten. Diese horizontalachsigen Peltonturbinen waren mit je drei eng nebeneinander angeordneten Düsen ausgerüstet, deren Strahlen sich jedoch in den Becherrädern gegenseitig störten, so daß nach wenigen Jahren ein Umbau auf eindüsige Maschinen erfolgte. Diese Erkenntnis war eine dauernde, und unseres Wissens sind seither nirgends horizontalachsige Peltonturbinen mehr gebaut worden mit mehr als zwei Düsen pro Rad! Alle Turbinen dienten zum Antrieb von Gleichstrom-Generatoren; die Gruppen konnten durch entsprechende Wahl der Zahl der Schmelzöfen jeweils über längere Zeit mit günstiger, konstanter Last betrieben werden.

Nur wenige Jahre später (1909—1911) kam das noch größere Rhonewerk in Chippis dazu, in welchem ein anderer interessanter Turbinentyp Verwendung fand: Horizontalachsige Francis-Spiral-Doppelturbinen mit außenkranzlosen Laufrädern. Diese Turbinenart war zwei Jahre vorher bereits für das Albulawerk der Stadt Zürich verwendet worden, wo acht Einheiten zu 3000 PS unter 150 m Gefälle zur Aufstellung gelangten. Zur Verringerung der Spaltverluste waren die Schaufel-Außenkanten bereits mit Bördchen versehen worden, die Jahrzehnte später als «Kavitations-Leisten» bei Kaplan turbinen wieder zu Ehren kommen sollten, und die z. B. auch bei Flugzeugen in leicht abgewandelter Form zur Verhinderung des Zirkulationsabfalles am Ende von Tragflügelprofilen zur Verwendung kamen. Diese offenen Räder haben sich sehr gut bewährt, besonders dann, wenn häufige Instandstellungsarbeiten infolge von Sandangriffen notwendig sind. Alle Flüsse vom Gotthard ausgehend sind im Oberlauf wegen ihrer Quarzsandführung in Turbinenbauer-Kreisen «berücksichtigt», und die AIAG hat wohl nicht umsonst ihre neueren Werke Mörel und Ernen wiederum mit diesem besonderen Typ ausgerüstet.

Das höchste ausgenützte Gefälle der Schweiz wiesen um 1910 die Pelton turbinen von Vouvy mit 920 m und die Francis turbinen des Albulawerkes mit 150 m auf.

Auf dem Gebiet der Turbinen für Niederdruckwerke an Flüssen und Kanälen, die weitgehend als Laufwerke betrieben wurden, war man, wie eine Rückschau heute klar erkennen läßt, an einem Endpunkt angelangt. Es war bereits bekannt, daß die größte Umfangsgeschwindigkeit der Turbinenlaufräder sich nicht beliebig steigern ließ, sondern daß sie für guten Wirkungsgrad, ruhigen Lauf und zur Verhütung starker Korrosionen in verhältnismäßig engen Grenzen bestimmt war durch das Gefälle der Anlage (eine Erkenntnis, die auch heute noch ihre volle Gültigkeit hat). Andererseits wurden immer höhere Umdrehungszahlen verlangt, insbesondere um die Kosten der Generatoren zu senken. Bereits die achsial durchflossene Jonvalturbine hatte man mehr-räderig angeordnet, was bei Anlagen mit stehender

Welle zu den sogenannten «Etagen-Turbinen» führte; um die Regulierfähigkeit, d. h. die Teillast-Wirkungsgrade zu verbessern, hatte man überdies häufig die einzelnen Räder in mehrere radial getrennte, oft verschieden geformte Teil-Laufräder unterteilt. Dabei wurden viele komplizierte, störungsanfällige Reguliereinrichtungen vorgeschlagen, die jedoch kaum je voll überzeugten und befriedigten. Typische Ausführungsbeispiele dieser Art waren die Maschinen von Chèvres und Rheinfelden.

Wie auch heute noch, muß von Fall zu Fall abgeklärt werden, ob die stehende oder liegende Welle gewählt werden soll. Bei der horizontalen Welle besteht die Möglichkeit, die ganze Gruppe über dem Unterwasserspiegel anzuordnen, wenn das Prinzip der «Saugrohre» bis zur Grenze ausgenützt wird. Wenn dann noch durch entsprechende paarweise Anordnung der Laufräder der hydraulische Achsialschub weitgehend ausgeglichen werden kann, ist das bei vertikalen Gruppen so überaus wichtige und häufig heikle Spurlager unnötig, und kann möglicherweise durch ein einfaches Bundlager ersetzt werden. Bei gleichem Gefälle und gleicher Total-Wassermenge pro Gruppe kann die Maschinendrehzahl um die Quadratwurzel aus der Laufradzahl gesteigert werden. Ob jeweils zwei Laufräder, Rücken an Rücken, zu sog. «Doppelturbinen» vereinigt werden, oder zwei Laufräder mit gemeinsamem Abströmekessel und Saugrohr zu einer «Zwillings-turbine», spielt dabei keine Rolle. Alle diese Möglichkeiten wurden in extremer Weise in den beiden Kraftwerkanlagen Augst-Wyhlen und Laufenburg ausgenützt: Es wurden jeweils zwei Zwillings-turbinen zu einer vier-räderigen Gruppe vereinigt, aufgestellt in großen Wasserkammern mit freiem Spiegel. Dabei war z. B. in Laufenburg die Turbinenwelle 6—7 m über dem Unterwasserspiegel aufgestellt, und diese Saughöhe vergrößerte

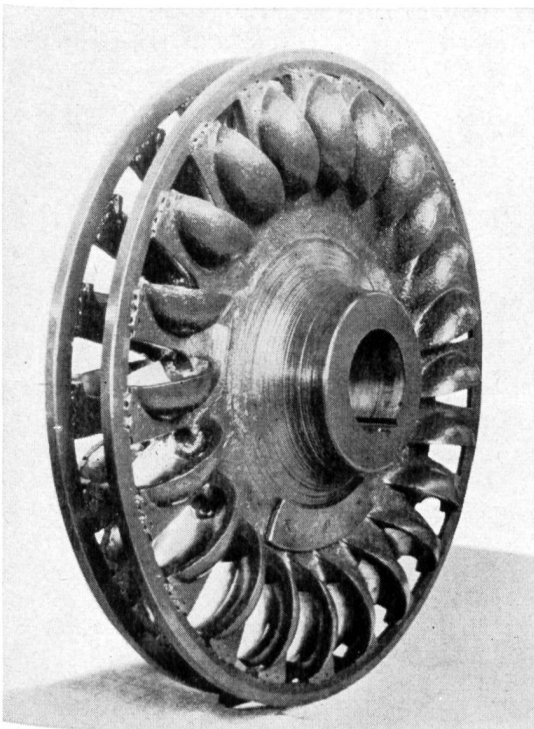


Bild 2 Einteiliges Peltonrad mit aufgeschweißten Verstärkungsringen für das Kraftwerk Klosters-Küblis; 10 000 PS, H etwa 300 m (1920)

Photo Bell

sich noch im Laufe der Jahrzehnte, indem der Rheinwasserspiegel infolge Erosion im Flußbett dauernd sank. Natürlich versuchte man, die Schnellläufigkeit der verwendeten Francislaufräder auf verschiedene Weise zu steigern; von besonderer Bedeutung waren um 1910 die «Sackschaufeln», so genannt nach ihrer sackartigen Formgebung im Aufrißprofil. Diese Schaufelformen waren nicht einfach in der Herstellung, ob aus Blech gepreßt oder aus Gußeisen gegossen, und infolge der starken Umlenkungen, der divergenten Saugrohr-Oberseite und hohen Absolut-Saughöhen waren kräftige Kavitationsschäden nicht selten (eine technische Bezeichnung, die damals noch nicht verwendet wurde).

Am Abschluß dieser Entwicklungsperiode um 1910 bis 1912 herum waren wohl die Laufenburgturbinen mit 7500 PS unter ca. 11,4 m Gefälle die stärksten Niederdruckturbinen in der Schweiz. Im besten Wirkungsgradgebiet blieb die spezifische Drehzahl n_s pro Rad noch eindeutig unter 300, wobei die Definition gilt

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

Darin sind einzusetzen: Gefälle H in m

Turbinenleistung P_t in PS

Drehzahl n in U./min

B. Die Entwicklung von 1910 bis 1960

Wenn auch natürlicherweise die Entwicklungen der verschiedenen Turbinentypen sich immer gegenseitig beeinflussten und gar anspornten und demnach in enger Verbundenheit erfolgten, sollen sie doch der Übersichtlichkeit halber getrennt angegeben werden.

1. *Freistrahlturbinen.* Gleich am Anfang der Betrachtungsperiode, kurz vor dem Ersten Weltkrieg, wurde mit dem Werk Fully der E. O. S. ein besonderer Markstein gesetzt, indem das außerordentlich hohe Gefälle von 1650 m, vom Fully-See bis ins Rhonetal hinunter, in einer Stufe ausgenützt wurde; es war bis zum Bau des Dixence-Werkes das höchste Gefälle der Welt. Die Leistung war mit 3000 PS relativ gering, die 500 U./min ebenfalls, und die Dimensionen der mit «Schwalbenschwänzen» in der Radscheibe befestigten Becher klein. Hier soll auf eine Relativzahl hingewiesen werden, die bei Pelton-turbinen eher aufschlußreicher ist, als die spezifische Drehzahl n_s , nämlich das Strahl-Verhältnis m:

$$m = \frac{D_1}{d_1} = \frac{\text{Strahlkreis-}\varnothing \text{ des Laufrades}}{\text{Engster Strahl-}\varnothing \text{ bei Vollast}}$$

Es ist heute selbstverständlich, daß für Laufräder mit gleichzeitig gutem Wirkungsgrad und hoher Sicherheit gegen Korrosionen durch Tropfenschlag zwischen dem Wert m und dem Turbinengefälle H ein Zusammenhang besteht, indem für ein bestimmtes Gefälle für m ein Minimalwert nicht unterschritten werden sollte, der mit steigendem H ebenfalls zunimmt; für die Turbinen Fully betrug dieser Wert noch über 80! Umfangreiche Untersuchungen an Modellturbinen, verbunden mit den Messungen an den Großturbinen ergaben, daß die besten Wirkungsgrade etwa zwischen $m = 10$ und 15 erwartet werden dürfen; man geht heute für Turbinen großer Leistung kaum noch unter $m = 10$, aber für hohe Gefälle muß auch heute noch über $m = 15$ gegangen werden.

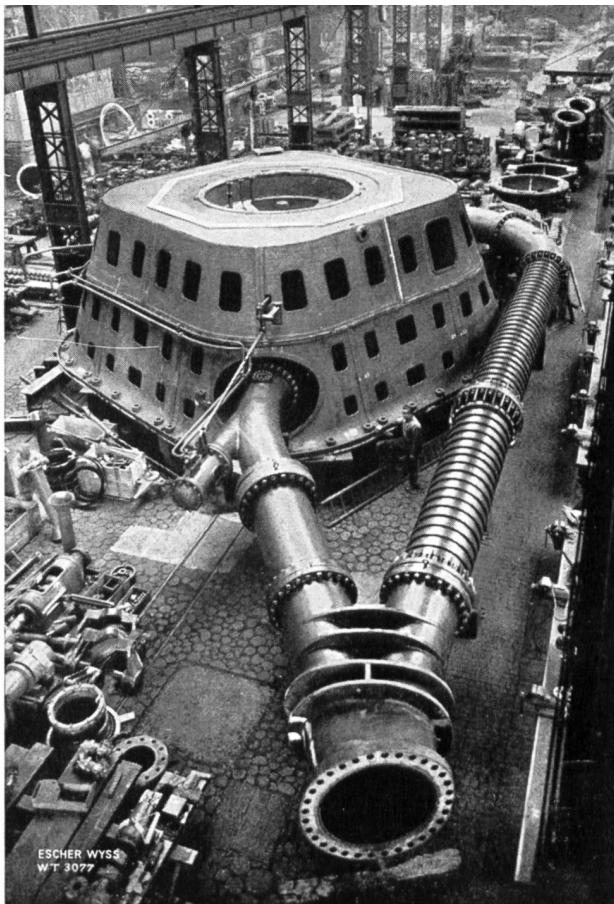


Bild 3 Werkstattmontage einer der fünf vertikalachsigen, zweidüsigen Freistrahlturbinen für Innertkirchen; 58 400 PS, H etwa 670 m (1940)

Einen besonderen Auftrieb in ihrer Entwicklung erhielten die Peltonturbinen in der Schweiz mit dem Bau der Bahnkraftwerke, die unter dem Eindruck der außerordentlichen Kohlenknappheit noch während und unmittelbar nach dem 1. Weltkrieg in rascher Folge entstanden: Amsteg, Ritom, Barberine, Vernayaz. Abgesehen von einigen Drehstrom-Generatoren waren alle diese Turbinen zur Hauptsache mit Einphasen-Generatoren gekuppelt. Die dauernde, stark wechselnde Belastung stellte besondere Anforderungen an die Bereitschaft und die Regulierfähigkeit der Turbinen. In allen

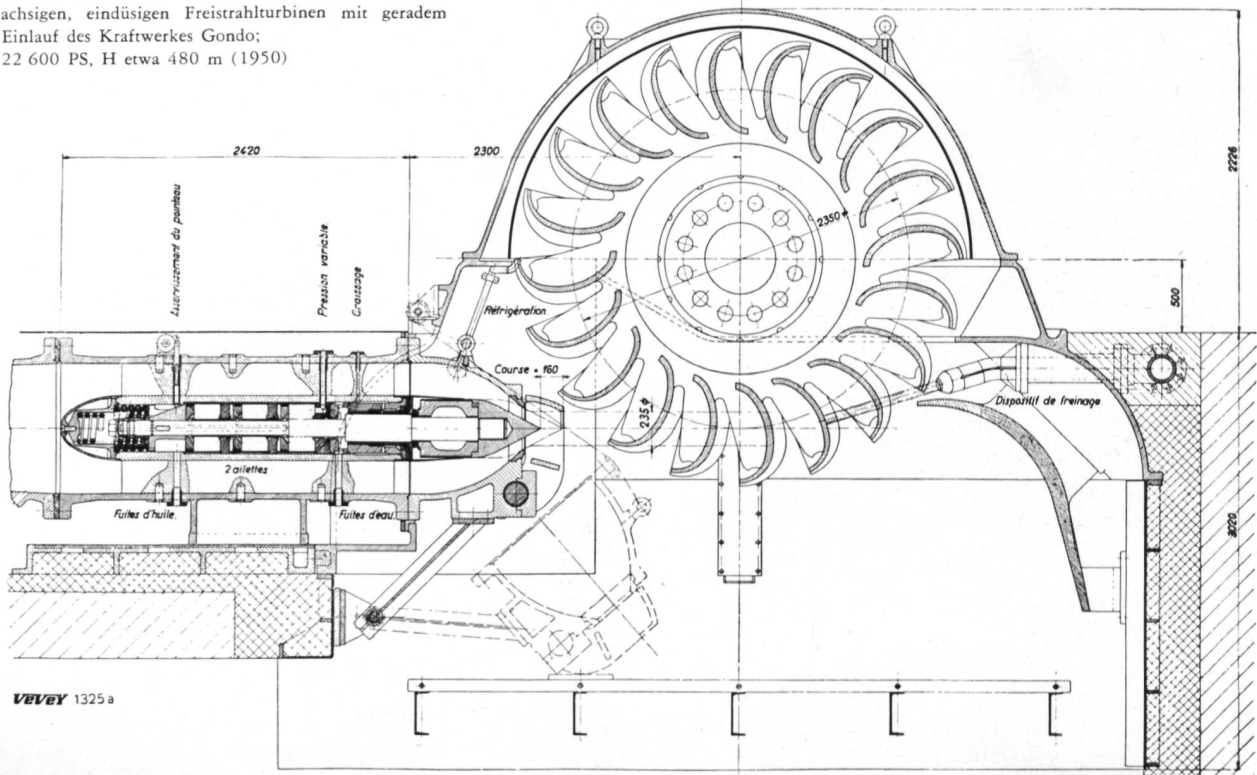
diesen Werken wurden die gleichen «klassischen» Peltonturbinen eingebaut, mit horizontaler Achse, eindüsig. Rund zehn Jahre vor dieser Bauperiode der SBB war allerdings schon das Werk Kandergrund gebaut worden, mit mehreren Einphasen-Generatoren für die Lötschbergbahn; auch das Baukraftwerk Massaboden für den Simplontunnel I war auf Einphasen-Wechselstrom umgebaut worden.

Anschließend stand im Vordergrund des Interesses der Bau des Kraftwerkes Handeck I, mit welcher die Kraftwerke Oberhasli AG einen systematischen Ausbau einleiteten, der auch heute noch nicht abgeschlossen ist. Charakteristisch waren hier die vertikalachsigen zweidüsigen Peltonturbinen, deren gegenläufige Strahlen ein reines Drehmoment erzeugen; der Generator ist pagodenartig auf dem Turbinengehäuse aufgebaut, und das Turbinenlaufrad sitzt auf der verlängerten Generatorwelle. Offensichtlich hat sich diese Anordnung bewährt, sonst wäre sie nicht in den andern Werken Innertkirchen und Handeck II, sowie im Etzelwerk (SBB/NOK) angewandt worden.

Für kleinere Leistungen war es naheliegend, mit noch mehr Strahlen auf das gleiche Rad zu arbeiten; so entstanden die vertikalachsigen Anlagen Palü und Cavaglia, im Puschlav, mit spiralförmiger Zuleitung des Wassers auf die vier Düsen. Es liegt auf der Hand, daß bei großer Düsenzahl die Drehzahl gesteigert und das Strahlverhältnis günstig gewählt werden kann, gleichzeitig aber die Laufräder der Gefahr verstärkter Abnutzung ausgesetzt werden.

Unbestreitbar ein Ereignis in der Geschichte des Turbinenbaues war die Errichtung des Dixence-Kraftwerkes im Wallis. Das dort in einer Stufe ausgenützte Gefälle von 1750 m blieb ein gutes Vierteljahrhundert lang Weltrekord und ist erst vor wenigen Jahren vom österreichischen Reißeck-Werk um wenige m übertroffen worden. Das dort angewendete Prinzip der Aufteilung der Leistung von 50 000 PS auf zwei Turbinen mit je einer Strahldüse hat sich bewährt und wird bis

Bild 4 Querschnitt durch eine der zwei horizontalachsigen, eindüsigen Freistrahlturbinen mit geradem Einlauf des Kraftwerkes Gondo; 22 600 PS, H etwa 480 m (1950)



heute mit Erfolg ausgeführt (Tinzen, Oberaar, Maggia, Blenio, Bergell u. a.). Hier wurde ebenfalls erstmalig ein Vorläufer des heutigen «geraden» Einlaufes gebaut, eine Lösung, die auf alle Fälle bei der Disposition einer Anlage Vorteile bieten kann.

Als letzte Variante der mehrdüsigigen vertikalen Peltonturbinen sind diejenigen von Göschenen mit drei Düsen ausgerüstet worden, in einer gegenseitigen Anordnung allerdings, daß der volle Druck einer Düse als Reaktion auf das Führungslager wirkt.

Während früher die Mundstücke der Einläufe und die Nadelköpfe nach sog. «Wendepunktskurven» ausgebildet waren, ist heute die kegelige Form allgemein üblich; die scharfe Schließkante der Düse, die oft die Ursache von Korrosionen am Nadelkopf war, hat auch bei hohen Gefällen dem Flächensitz von einigen mm Länge weichen müssen. Die Dichtheit der Nadeldüsen konnte zeitlich stark verlängert werden, auch wenn aus Gründen der Bereitschaft die Absperrorgane der Turbinen seltener geschlossen werden. Wenn eine Gruppe im Phasenschieberbetrieb arbeiten muß, sollte aus zwei Gründen die Verlustleistung aus dem Netz bezogen, und nicht von der Turbine gedeckt werden: Zunächst ist auf diese Weise zweifellos der Verlust an hydraulischer Energie kleiner, ferner kann das Laufrad bei längerem Betrieb mit einem qualitativ schlechten Strahl bei kleiner Öffnung unverhältnismäßig stark abgenutzt werden.

Eine entscheidende Wandlung ist bei der Konstruktion der Laufräder selbst eingetreten. Abgesehen von Kleinanlagen wurden fast immer die Becher einzeln auf einer rotierenden Scheibe befestigt (siehe Fully). Ob eingepaßte Schrauben, Quer- oder Radialkeile, Schwalbenschwänze, Klemmringe usw., wirklich befriedigt haben alle diese Befestigungsarten nie. Früher oder später tritt meist unter dem Einfluß dieser harten, schlagartigen Wechselbelastung doch immer eine Lockerung auf, und auch weitgehende Sicherungen durch Schweißung haben sich nicht als unfehlbar erwiesen. So versuchte man es denn Ende der 20er Jahre auch bei großen Laufrädern mit einteiligen Ausführungen. Da man jedoch damals bei gegebenem Gefälle das Strahlverhältnis zu stark herabdrückte, traten Tropfenschlag-Korrosionen hinter der Spitze der Mittelschneide, Anrisse in den Becher-Ausschnitten und andere Beschädigungen auf, besonders dann, wenn die Räder gleichzeitig auf hohen Wirkungsgrad «gezüchtet» worden waren. Heute darf diese Gefahr weitgehend als behoben bezeichnet werden, da bezüglich H-m-Zusammenhang eine gewisse Rückbildung eingesetzt hat. Als Episode im damaligen Bau der Peltonräder müssen die in einigen Anlagen von Bell angebrachten Verstärkungsringe bezeichnet werden, die die Becher am Umfang gegeneinander abstützten und sicherten; auch sie sind heute überflüssig geworden.

Die außerordentliche Entwicklung im Guß einteiliger Peltonlaufräder seit ungefähr 30 Jahren ist zweifellos die Folge der intensiven, vertrauensvollen Zusammenarbeit zwischen Turbinenbauern, Stahlwerk und Elektrizitätswerken. Heute können für alle noch so extremen Verhältnisse einteilige Laufräder beschafft werden; gleichzeitig hat man sich an einen regelmäßigen Überwachungsdienst gewöhnt, und die Technik der Reparatur durch elektrisches Schweißen ist vervollkommen worden. Die immer zweckmäßiger ausgebildeten Rad-

formen, zusammen mit möglichst exakter Einhaltung der Dimensionen und Winkel, steigern ebenfalls die Haltbarkeit.

Während die ersten Becher der Dixence-Turbinen noch im Gesenk geschmiedet wurden, konnten sie später durch gegossene Becher ersetzt werden. Andernorts ist es gelungen, korrosionsfreie Räder aus niedrig legiertem Stahlguß zu verwenden, wo sonst nur nichtrostender Stahlguß die nötige Sicherheit zu gewährleisten schien. Häufig werden von Anfang an die gefährdeten Stellen niedrig legierter Laufräder durch Auftragen hochwertiger Materials geschützt.

2. *Francis-Turbinen.* Das ständige Drängen nach immer schneller laufenden Turbinen führte zu intensiven Studien im In- und Ausland. Kurz vor dem Ersten Weltkrieg erschienen die ersten Vorschläge von Prof. Kaplan, die sich durch die Verwendung kranzloser Laufräder mit wenigen kurzen Schaufeln auszeichneten; die Räder waren in weitem Abstand vom Leitapparat angeordnet und axial durchflossen; ein besonderer Mechanismus in der Nabe erlaubte ihre Verstellung im Betrieb.

In der Schweiz war es jedoch vorerst die als X- oder Dubs-Turbine bekannte Schnellläuferturbine, mit n_s bis über 400, die häufig zur Anwendung kam, insbesondere auch, weil im kriegführenden Österreich aus naheliegenden Gründen die Entwicklung der Kaplan-turbine zu einem Stillstand kam. Andere ausländische Forscher, wie Lávaček, Pfau usw. wirkten ebenfalls anregend, so daß bald alle schweizerischen Turbinenfabriken über Francis-Schnellläufertypen verfügten. Die Ära der horizontalachsigen Mehrradturbinen wurde abgelöst durch die vertikalachsigen, einräderrigen Schnellläufer-Anlagen. In rascher Folge wurden die Kraftwerke Olten—Gösgen, Eglisau, Mühleberg und Chancy-Pougny errichtet. Auch hier wurden noch verhältnismäßig große statische Saughöhen gewählt, mit Saugrohrformen, wie sie beispielsweise in den USA noch lange üblich waren. Alle diese Maschinen wurden bereits in spiralförmig ausgebildete, vollständig geschlossene und unter Druck stehende Betonkammern eingebaut.

Damit aber war die Anwendung der Francisturbine bei großen Flußkraftwerken in der Schweiz abgeschlossen.

Dafür ergab sich eine neue Entwicklungsrichtung für diesen Turbinentyp für immer höhere Gefälle.

Bild 5 Horizontalachsige Francis-Doppel-Zwillingsturbine, mit vier getrennten Laufrädern, für Aufstellung in offener Wasserkammer, für relativ große Wassermengen bei kleinen Gefällen; Handregulierung (etwa 1920)
Photo Charmilles

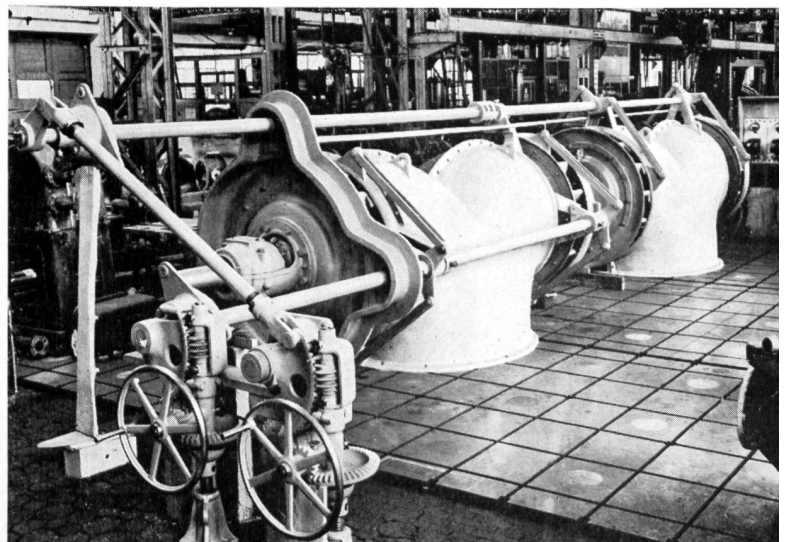
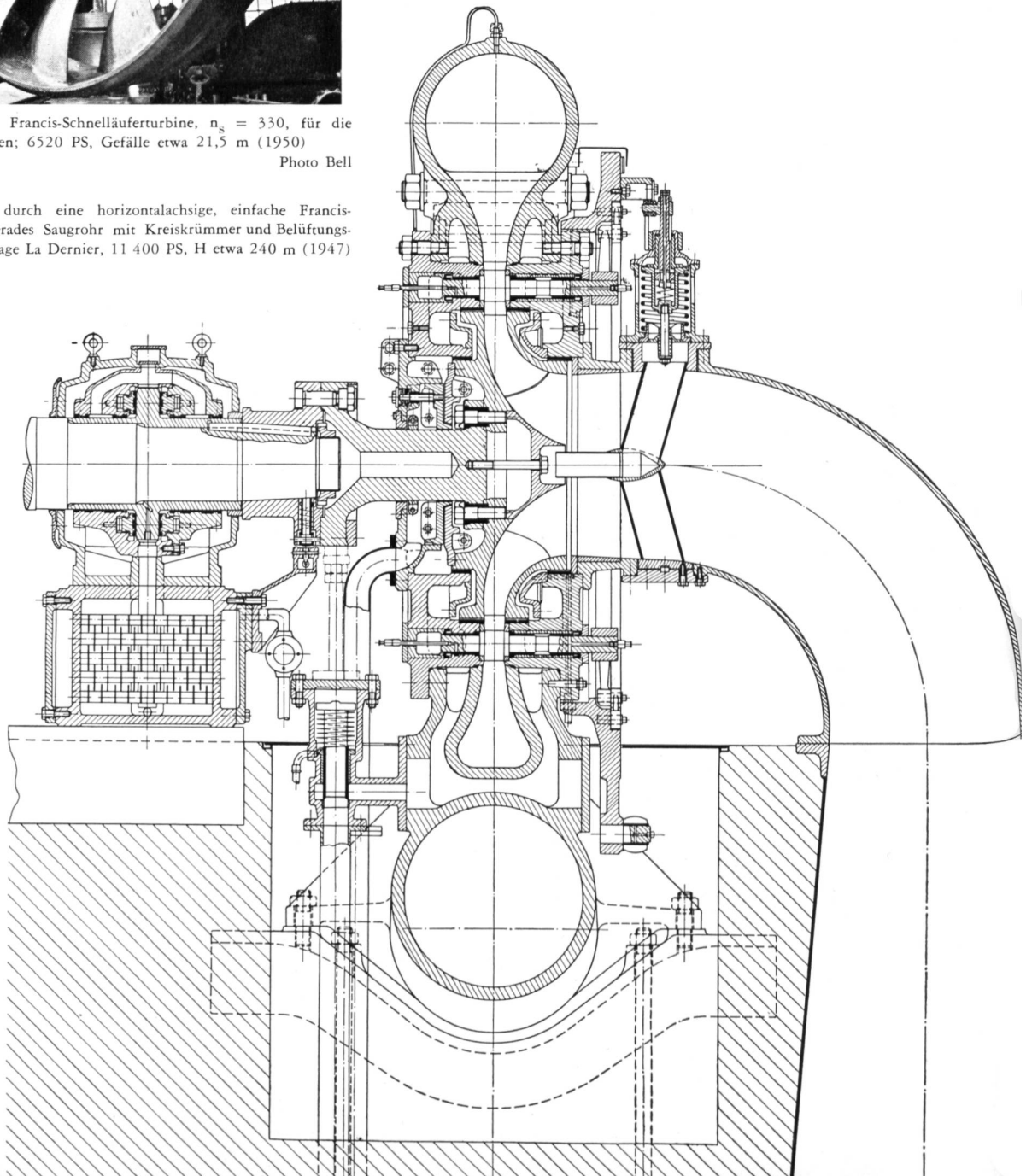




Bild 6 Extreme Francis-Schnellläufturbine, $n_s = 330$, für die Anlage Neuhausen; 6520 PS, Gefälle etwa 21,5 m (1950)

Photo Bell

Bild 7 Schnitt durch eine horizontalachsige, einfache Francis-Spiralturbine; gerades Saugrohr mit Kreiskrümmung und Belüftungseinrichtung; Anlage La Dernier, 11 400 PS, H etwa 240 m (1947)



In den 20er Jahren wurde der Bau des zweistufigen Wäggital-Werkes vollendet, wobei je vier Francis-Spiralturbinen zur Aufstellung gelangten. In der oberen Zentrale Rempen war ein Gefälle von 260 m vorhanden und eine Maschinenleistung von max. ungefähr 22 000 PS bei 500 U./min. Rund 20 Jahre später wurden die Turbinen des Juliawerkes der Stadt Zürich mit 1000 U./min gebaut, bei 285 m Gefälle und ungefähr 19 000 PS Leistung. Die Vorteile der Hochdruck-Francis-Spiralturbinen gegenüber den Freistrahlturbinen waren augenfällig: Höhere Drehzahl, kleinere Dimensionen und Gewichte, Wegfall des Freihanges. Gefälls-Stufen, die bisher eindeutig mit mehrdünsigen Freistrahlturbinen ausgebaut worden waren, erhielten nun Francisturbinen: Lungernsee und insbesondere Piottino sind Vertreter dieser neuen Entwicklung, ebenso Mörel und Ernen.

Der eminente Vorteil des geschlossenen Ablaufes zeigte sich insbesondere bei den Kavernenwerken, wo nicht mehr ein Freispiegelstollen bis zu den Turbinen notwendig war. Dafür galt es, den besonderen Regulierverhältnissen Rechnung zu tragen, beispielsweise durch

Anordnung von Wasserschloßern unmittelbar nach dem eigentlichen Turbinensaugrohr. Nachdem die Schweizer Industrie mit Anlagen im Ausland Erfahrungen sammeln konnte, wurde die Gefällsgrenze auf 400 m und höher ausgedehnt: Verbano, St-Léonard, Safien und Fionnay entstanden, wobei die letztgenannte Anlage mit 462 m stat. Gefälle während einigen Jahren Weltrekord für Francis-Turbinen bedeutete. Heute sind Maschinen für rund 500 m Gefälle im Bau.

Es ist nicht verwunderlich, daß diese hochtourigen Maschinen großer Leistung besondere Probleme aufwarfen. Die Anordnung und Ausbildung der Drosselstrecken zwischen dem rotierenden Laufrad und dem stillstehenden Teil war besonders wichtig, nicht nur zur Verhinderung eines unzulässigen Wasserverlustes, sondern auch hinsichtlich ruhigem Lauf und allfälliger Sandabnutzung. Besonders das letzte Argument ist bei der Wahl von Francisturbinen für hohe Gefälle zu berücksichtigen, und an Kontroversen in Zeitschriften über das Für und Wider, Francis oder Pelton, hat es nicht gefehlt. Abgesehen davon, daß offenbar mit recht verschiedenen Formgebungen der Labyrinth die gleichen befriedigenden Resultate erzielt werden können (glatter, langer Zylinderspalt, Treppen- oder Mäander-Labyrinth), sind auch gelegentlich Versuche mit Gummidichtungen angestellt worden, wobei die Eigenschaften des verwendeten Gummis das Ergebnis weitgehend beeinflussen.

Die hohen Absolutgeschwindigkeiten des Wassers zwingen auch zur genaueren Berechnung der Einbauhöhe, d. h. zur Berücksichtigung der Kavitationsverhältnisse. Durch Reduktion der spezifischen Drehzahl können dieselben verbessert werden, aber gleichzeitig werden die Laufräder relativ schmaler, was die Bearbeitung erschwert und den Wirkungsgrad herabsetzt. Bei Kavernenwerken spielt es jedoch kaum eine Rolle, in welcher relativen Höhe zum Unterwasserspiegel die Kaverne ausgebrochen wird; durch Tieferstellen der Turbine, d. h. Arbeiten im Gegendruck, können wieder höhere spezifische Drehzahlen erreicht werden. Gelegentlich genügt dann allerdings die natürliche Saugrohr-Belüftung bei Teillast oder Überlast nicht mehr, sondern es muß Druckluft verwendet werden.

Die Luft-Zuführung kann auf verschiedene Art erfolgen: Am Saugrohr-Umfang, durch besondere Belüftungsrohre ins Innere des Saugrohres, durch die hohlen Kupplungsschrauben oder gar durch die hohle Turbinenwelle. Bei Gegendruck muß besonders darauf geachtet werden, daß einerseits bei Abschaltungen die Luft nicht «zu spät» kommt, und daß kein Wasser-Rückfluß die Lagerung gefährden kann.

3. *Kaplanturbinen.* In der 1. Hälfte der 20er Jahre wurden in Deutschland die ersten, nach heutigen Begriffen kleinen Kaplan-Turbinenanlagen gebaut. Da insbesondere das Prinzip der Doppel-Regulierung durch Patente geschützt war, wurden von verschiedenen Konstrukteuren andere Lösungen gesucht. Eine davon ist unter dem Namen «Schraubenturbine» der Firma Bell bekannt geworden; die damit ausgerüstete Anlage Matte bei Bern ist oft beschrieben worden. Mit sog. «Propeller-Turbinen» haben die Ateliers de Constructions Mécaniques de Vevey das Kraftwerk Wynau II beliefert. Auch im Werk Beznau der NOK wurden wenige Jahre später im Zuge eines Umbaus Propellerturbinen eingebaut.



Bild 8 Extremer Francis-Langsamläufer für hohes Gefälle; Laufrad für eine der Turbinen des Kraftwerkes Fionnay/Mauvoisin, 62 800 PS, H etwa 455 m (1956)
Photo Escher-Wyß

Die erste doppelt regulierte Kaplanturbine in der Schweiz wurde 1925 von Escher-Wyß für das kleine Kraftwerk Glattfelden der EKZ geliefert. Die Laufrad-Verstellung, die über eine rotierende Mitnehmer-Muffe mit «Doppelspurlager» erfolgte, war ein Sorgenkind. Schwierigkeiten bereitete auch der auftretende starke Leistungsrückgang infolge des Geschwemmsels; es war zunächst schwer verständlich, daß bei nur vier Laufradschaufeln eine solche Verschmutzung durch Gras

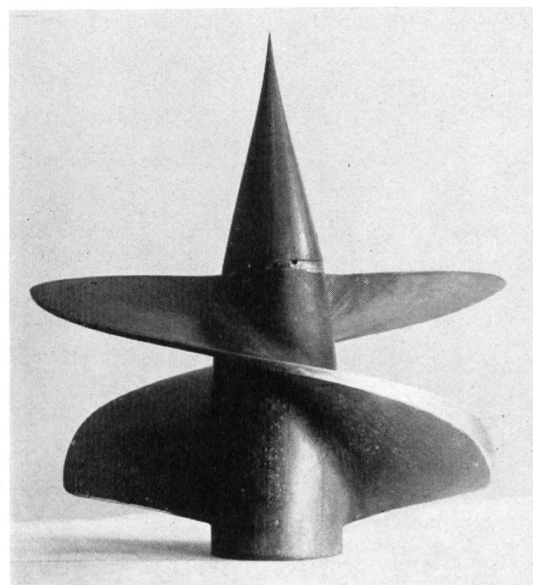


Bild 9 Laufrad einer Propellerturbine mit zweigängigem Propeller für die Anlage Matte; 300 PS, H etwa 3 m (1920)
Photo Bell

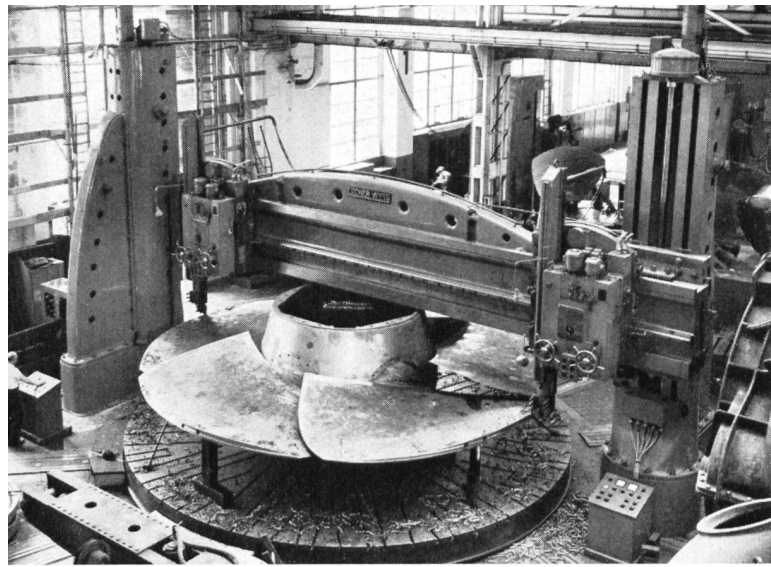


Bild 10 Maschinelle Bearbeitung eines 5schauffigen Kaplanlaufrades; Überdrehen der kugeligen Außenbegrenzung. Photo Escher-Wyß

und Laub eintreten könnte. Spätere Untersuchungen zeigten, daß die Anlage knapp oberhalb der für die vorhandene Schaufelung kritischen Kavitationsgrenze aufgestellt war. Alle diese heute wohl bekannten Phänomene mußten damals in oft mühseliger Kleinarbeit abgeklärt werden.

Nachdem noch für Windisch und die Jurazementfabriken in Aarau Propellerturbinen nach dem Kaplanprinzip bestellt worden waren, wagte man sich schon an eine Extrapolation, die der Kaplanmaschine endgültig

zum erfolgreichen Durchbruch verhelfen sollte: das Projekt von Ryburg-Schwörstadt! Die gemeinsamen Anstrengungen der in einer Arbeitsgemeinschaft vereinigten Firmen Charmilles, Escher-Wyß und Voith mit der bauleitenden Firma Motor-Columbus führten zu einem vollen Erfolg.

Kaum je vorher ist wahrscheinlich für ein Kraftwerk in so großem Umfang die Technik der Versuche an Modellen angewendet worden. Besondere Modellturbinen für die eigentlichen Wirkungsgrad- und für die Kavitationsversuche wurden hergestellt; verschiedene Formen von Spiralgehäusen, Saugrohren und Laufträgern wurden untersucht und schließlich eine Einheitskonstruktion entwickelt, welche verschiedene Neuheiten aufwies, die sich bewährten, z. B. die kugelige Nabe, der halbkugelige Außenmantel, das 5schauffige Lauftrad. Im Regler waren je ein Steuerpendel für den Leitapparat und für das Lauftrad vorgesehen; die Erfahrung zeigte bald, daß das letztere besser in Endlage blockiert wird, und seit langen Jahren weisen auch die doppelt regulierten Kaplanmaschinen nur ein Steuerwerk auf. Bei der Inbetriebsetzung der 1. Gruppe konnte auch Prof. Kaplan begrüßt werden.

In rascher Folge wurden die beiden andern großen Flußkraftwerke Albruck-Dogern und Klingnau gebaut, weitgehend nach den gleichen Prinzipien. Hatten diese Anlagen mit Gefällen bis 11,5 m bereits die kühnen Er-

wartungen von Kaplan weit übertrafen, so sollte mit dem Kraftwerk Wetztingen des EWZ das Gefälle verdoppelt werden. Mit dieser Ausdehnung auf 23 m griff die Kaplanmaschine bereits ins Gebiet der «Mitteldruckanlagen» über, wo bis anhin nur Francisturbinen der spez. Schnellläufigkeit 300—320 in Frage kamen. Das Vertrauen und der Unternehmungsgeist, welche die verantwortlichen Stellen des EWZ damals dem Vorschlag auf Anwendung der Kaplanmaschinen entgegenbrachten, hat sich in vollem Umfange gelohnt.

Eine große Zahl von kleinen und mittleren Anlagen wurden nun mit Kaplanmaschinen ausgerüstet, insbesondere solche an Bächen und Flüssen mit stark wechselnder Wasserführung. Kurz vor und während dem Zweiten Weltkrieg wurden die Flußkraftwerke Reckingen, Verbois und Rapperswil-Auenstein gebaut. Unmittelbar nach Kriegsende wurde der Bau des Kraftwerkes Lavey an der Rhone in Angriff genommen, das erste Laufkraftwerk in Kavernenbauweise; das Nutzgefälle der Kaplanmaschinen kann hier bis 42,8 m steigen.



Bild 11 Montage eines 8schauffigen Kaplanrades im Kraftwerk Lavey; 33 650 PS, H 42 m (1948)

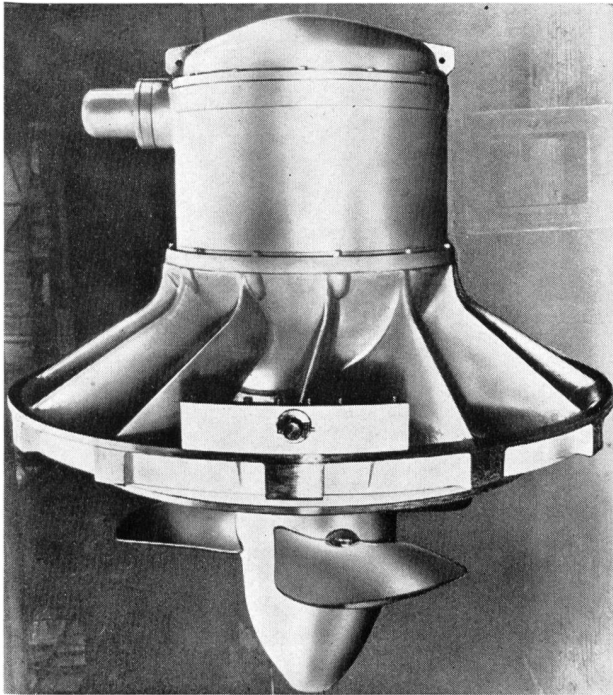


Bild 12 Bild einer modernen Kaplan turbine für kleine Gefälle und Leistungen, mit festem konischem Leitapparat und einfacher Laufwerk-Regulierung. Generator im verlängerten, verdickten Turbinenhals.

Photo Charmilles

Die Reihe der großen Flußkraftwerke wurde bis heute weitergeführt mit Wildegg-Brugg, Rheinau und Birsfelden. Während bei der «klassischen» Anordnung sich das Spurlager oberhalb des Generators befand, wurde es nun zwischen Rotor und Turbinendeckel angeordnet; die Bauhöhe ließ sich so erheblich reduzieren.

Die Kaplan turbine wurde vor allem auch häufig angewendet bei der Modernisierung alter Anlagen. Gelegentlich wurden auch besondere Lösungen gewählt, so in der Anlage Linsenthal, wo je nach Wasserführung und Gefälle unter drei Turbinendrehzahlen die günstigste eingestellt werden kann. Vor kurzem ist nun auch die erste Rohrturbine in der Schweiz aufgestellt worden.

4. *Speicherpumpen.* Als ausgesprochenes Speicherwerk im heutigen Sinn existierte zur Zeit der Gründung des SWV unseres Wissens nur das Werk Ruppoldingen, wo 1904 eine Speicherpumpe von ca. 800 PS bei etwa 320 m Förderhöhe installiert worden war. Von ähnlicher Leistung waren die Speicherpumpen im Werk C der Stadt Schaffhausen.

Die ersten bedeutenden Speicherpumpen, die in der Schweiz zur Aufstellung gelangten, waren die vier Pumpen im Kraftwerk Rempen ($H_f = 260$ m, $P_w = 5000$ PS) und die zwei Pumpen des Tremorgiowerkes mit der außerordentlich großen Förderhöhe von rund 850 m! Während des Zweiten Weltkrieges wurde diese Förderhöhe im Kraftwerk Oberems mit 1000 m noch übertroffen. In allen diesen Fällen handelte es sich um separate Pumpengruppen mit eigenem Antriebsmotor.

Im Kraftwerk Etzel wurden erstmals in der Schweiz, wie bereits beim Bau vorgesehen, die Synchrongeneratoren zweier Turbinengruppen zum Antrieb der zwei Speicherpumpen verwendet. Besonderheiten dieser An-

lage sind die mechanischen Kupplungen zwischen Turbine und Pumpe, sowie das Auffangen der Pumpe bei Stromausfall mit Hilfe der sich öffnenden Pelton turbine; beide Einrichtungen haben sich gut bewährt.

Mit dem nach dem Zweiten Weltkrieg außerordentlich stark einsetzenden Ausbau der Wasserkräfte in der Schweiz wurden auch immer häufiger Speicherpumpen vorgesehen, so in Oberaar, Gouggra, Löbbia, Zervreila und Peccia. Gelegentlich konnten auch mit verhältnismäßig kleinen Zubringerwerken wie in Lucendo, Cleuson usw. Nebenflüsse in die Hauptwerke übergeleitet werden.

Das Hauptcharakteristikum im Speicherpumpenbau war bis zum Zweiten Weltkrieg die Steigerung der Maschinenleistung auf Werte, die dem Turbinenbau heute durchaus ebenbürtig sind. Seither ist vor allem die Förderhöhe pro Stufe auf über 200 m gebracht worden, eine Folge der großen Zulaufhöhen, wie sie z. B. in Kavernenwerken verhältnismäßig leicht realisierbar sind. Es unterliegt keinem Zweifel, daß die Anwendung des Prinzips der künstlichen Speicherung auch in der Schweiz noch nicht abgeschlossen ist; so sind

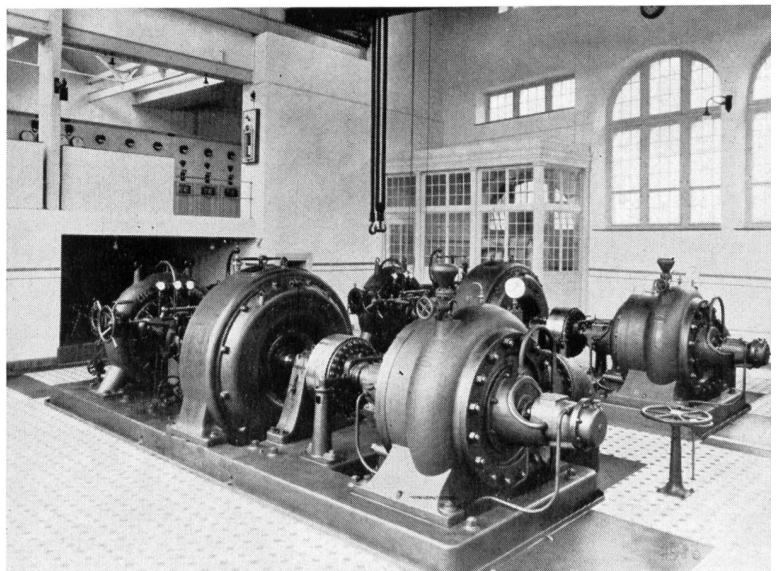
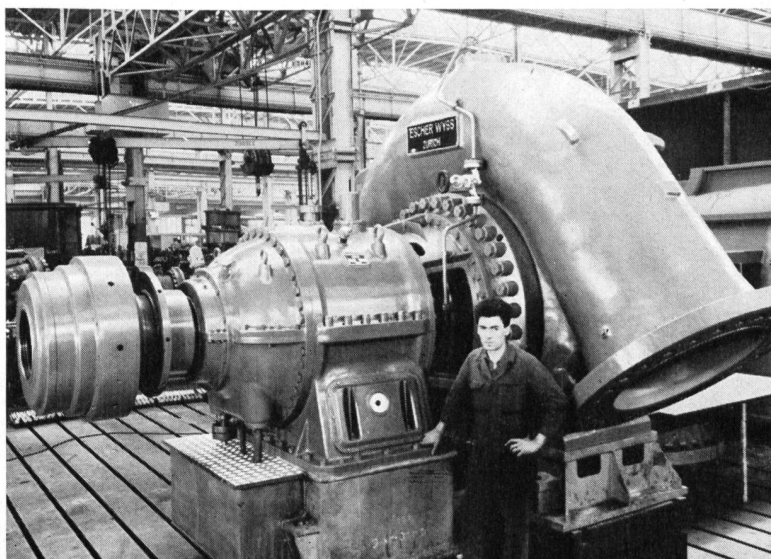


Bild 13 Speicherpumpengruppen aus dem Jahre 1908, horizontal, zwei-stufig, für 163 m Förderhöhe und 980 PS Leistung; Elektrizitätswerk der Stadt Schaffhausen, Werk C.

Photo Sulzer

Bild 14 Syphonpumpe Motec der Kraftwerke Gouggra für 9180 PS und 126 m Förderhöhe bei $n = 750$ U/min. Maximale Zulaufhöhe zur Pumpe 610 m!

Photo Escher-WyB



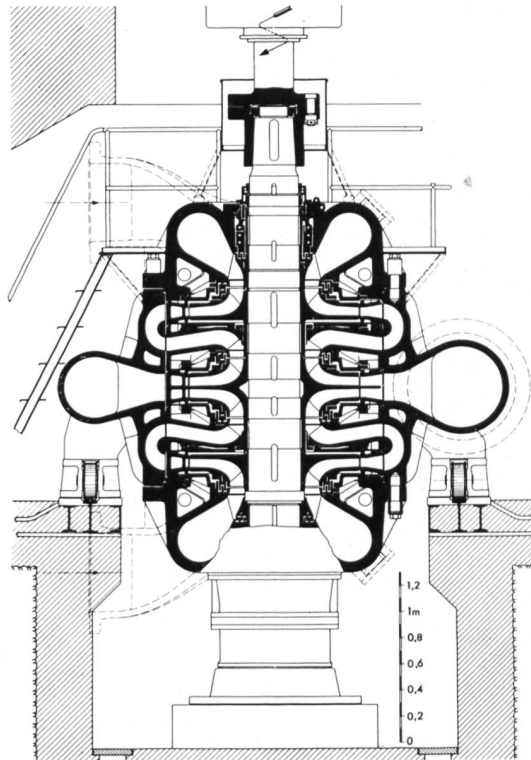
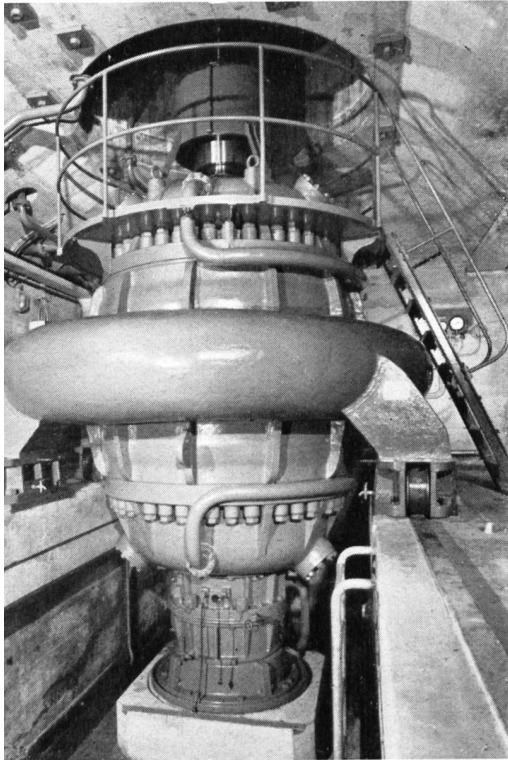


Bild 15
rechts: Längsschnitt durch die vertikal-
achsige, doppelflutige, zweistufige
Speicherpumpe des Kraftwerkes
Grimsel; 25100 PS, $H_f = 400$ m
(1954)

links: Außenansicht der Grimsel-
pumpe im Werk

Photo Sulzer

Speicherpumpen in den Hinterrheinkraftwerken, in Fuhren (KWO) usw. vorgesehen.

5. *Absperrorgane.* Um 1910 herum standen als Turbinen-Absperrorgane Flach-, Keil- und Brillenschieber zur Verfügung, ebenso Drosselklappen. Beide Typen hatten den Nachteil, daß sie eine mehr oder weniger starke Störung der Strömung erzeugten. Bei größeren Rohrdurchmessern wurden vor allem die Schieber recht voluminös.

Einen entscheidenden Fortschritt brachten hier in den 20er Jahren die Kugelschieber, welche in offener Stellung nur den Druckverlust eines entsprechenden Rohrstückes aufweisen. Zwischenstellungen müssen aber wegen der ungünstigen Strömung rasch durchfah-

ren werden. Das Dichtungsproblem wurde auf verschiedene Weise gelöst:

- Mit einer beweglichen Platte im Drehkörper, mit einer exzentrischen Bewegung des Drehkörpers,
- mit einem axial verschiebbaren Ring im Gehäuse.

Häufig wurden früher zwei Absperrorgane hintereinander angeordnet, das Reserve-Aggregat nur mit Handantrieb. Heute werden die Kugelschieber vielfach mit einer zweiten Dichtungs-Einrichtung ausgerüstet, welche eine Revision des Schiebers selbst ermöglicht, ohne daß die Druckleitung entleert werden muß. Neben den üblichen Ausführungen in Gußeisen oder meist Stahlguß sind heute für große Dimensionen und niedrigere Drücke auch vollständige Schweißkonstruktionen bekannt.

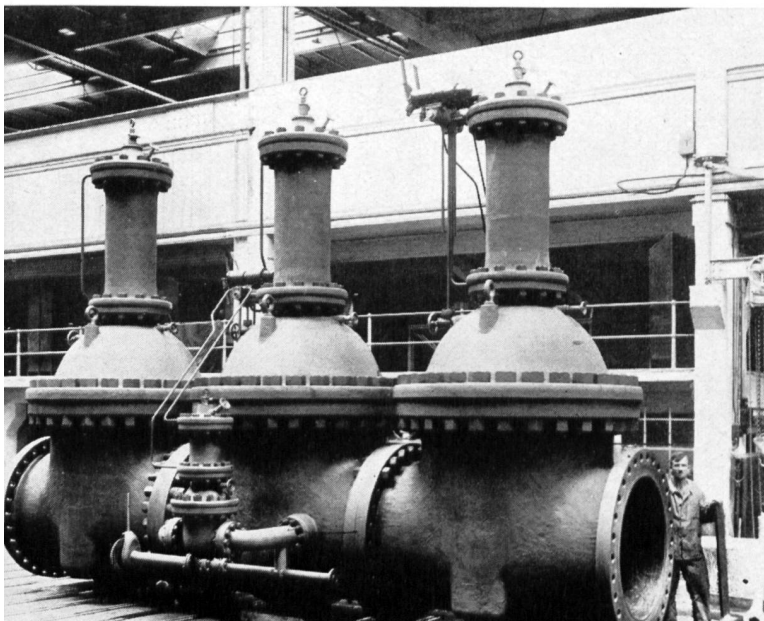
Es hat sich gezeigt, daß der Kugelschieber durchaus auch als Schnellschlußorgan bei Speicherpumpen verwendet werden kann, für den Betrieb jedoch nur in offener Stellung.

Bei den immer größer werdenden Variationen der Wasserstände in den Stauseen sind jedoch auch die Förderhöhen in weiten Grenzen veränderlich, so daß bei den großen Fördermengen gelegentlich gedrosselt werden muß, um Kavitationserscheinungen zu vermeiden. In diesen Fällen ist seit jeher der Ringschieber, meist in der Form eines Eckringschiebers, das gegebene Absperrorgan. Bereits die Tremorgio-Pumpen waren damit ausgerüstet; die dort noch zusätzlich vorhandene Rücklaufklappe jedoch wird heute als überflüssig betrachtet.

Ringschieber werden nun aber auch bei Turbinen verwendet. Eine neue Kombination ergibt sich beispielsweise bei Freistrahlturbinen mit geraden Einläufen, wo die beiden Zentralkörper des Ringschiebers und der Nadeldüse kombiniert werden können.

Bild 16 Keilschieber mit hydraulischem Antrieb für 78 at Betriebsdruck, mit 1200 mm lichter Weite; Bahnkraftwerk Vernayaz (1926)

Photo von Roll



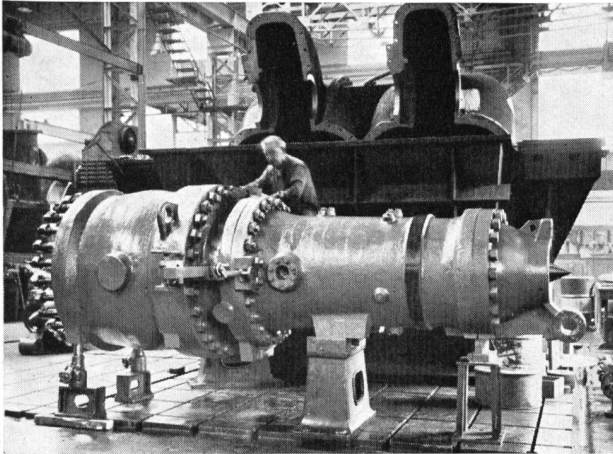


Bild 17 Kombination eines geraden Freistrahlturbinen-Einlaufes mit dem unmittelbar davor liegenden Ringschieber mit Doppelsitz; Ackersand II
Photo Charmilles

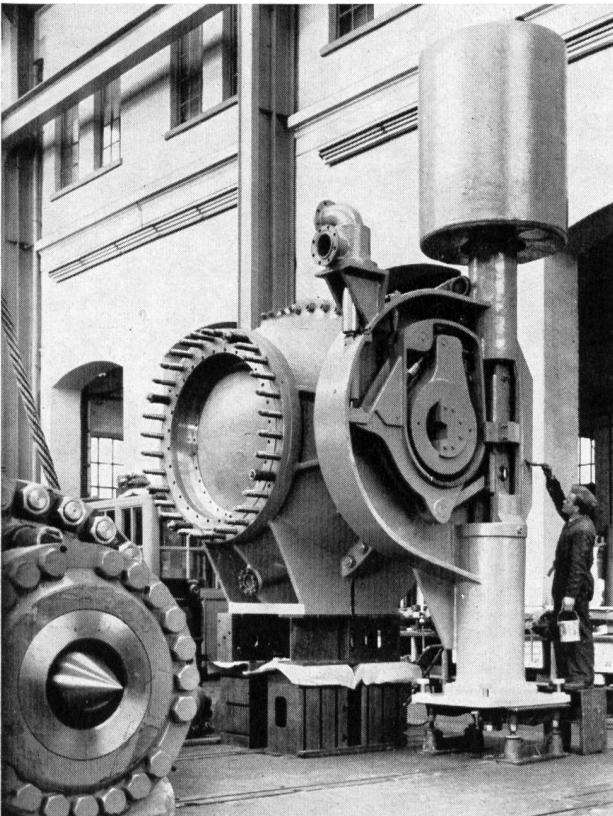


Bild 18 Kugelschieber mit Öffnungskolben und Schließgewicht für die Francisturbinen des Seewerkes der Zervreila AG; Betriebsdruck 13 at, 1300 mm lichter Weite
Photo Bell

C. Strömungsforschung und Materialprüfung

Der kurze Bericht über diese 50 Jahre Entwicklung der hydraulischen Maschinen wäre zweifellos unvollständig, wenn nicht wenigstens auf die eminente Bedeutung hingewiesen würde, welche die Forschungstätigkeit in hydraulischer und materialtechnischer Richtung erlangt hat.

Während anfangs mehr oder weniger systematische Studien in Europa vor allem an Hochschulen betrieben wurden, entstanden schon vor 40 Jahren in der Schweiz fabrikeigene Prüfstände, in welchen zunächst vereinfachte, komplette Modellturbinen auf ihre Charakteristiken untersucht wurden. Bald jedoch ergab sich die Notwendigkeit, die Methoden zu verfeinern, die Modelltreue exakter einzuhalten und einzelne Teilprobleme besonders zu behandeln. Mit der Kaplan turbine stellte sich das Problem der Kavitationssicherheit besonders deutlich, so daß speziell geeignete Versuchsstände geschaffen wurden, wo die Druck- und Saugverhältnisse in weiten Grenzen verändert, und die Strömungsbilder mit Hilfe stroboskopischer Beleuchtung beobachtet werden konnten; es ist weiter oben im Zusammenhang mit Ryburg—Schwörstadt auf diese Ausweitung der Forschungsarbeit verwiesen worden.

Parallel dazu drängten sich Untersuchungen nach besseren, widerstandsfähigeren Baustoffen auf. Einrichtungen, welche die Beanspruchungen durch Tropfenschlag (bei Pelton-Laufrädern) und Kavitation in vereinfachter Weise ersetzen, wurden für Dauer- und Serien-Versuche geschaffen. Sie wurden später ausgedehnt auf systematische Untersuchungen bezüglich Widerstandsfähigkeit gegen Sandangriffe.

Viele Untersuchungen für Teilprobleme, soweit es in geschlossener Strömung erfolgen kann, können heute ohne Weiteres mit Luft statt Wasser durchgeführt werden.

D. Die weitere Entwicklung

Die hydraulischen Maschinen haben heute einen hohen Stand der Entwicklung erreicht. Es können Einheiten großer Leistung mit hohen Wirkungsgraden und bemerkenswerter Betriebssicherheit gebaut werden; notwendig ist dazu die Berücksichtigung der Belange aller Beteiligten, und der vorbehaltlose Austausch aller Erfahrungen. Es scheint, daß die Entwicklung sich vor allem dahin richten wird, unter Beibehaltung der heutigen Qualität die Maschinen einfacher und leichter zu gestalten. Bei der Verfolgung dieser Tendenz darf nicht außer Acht gelassen werden, daß schließlich die Betriebstüchtigkeit der Turbinen und Pumpen jeweils die Wirtschaftlichkeit des ganzen Werkes gewährleisten muß.

Bild 19 Werkstattaufnahme einer Grundablaß-Schütze für die Staumauer des Kraftwerkes Mauvoisin; $2,95 \times 1,8$ m Querschnitt, maximal 200 m Druck

Photo Escher-Wyß

