Die Leistungsverbesserung bestehender Wasserkraft-Anlagen

Autor(en): **Moser, J.**

Objekttyp: **Article**

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

Band (Jahr): **35 (1943)**

Heft 6

PDF erstellt am: **04.06.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-921325

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.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

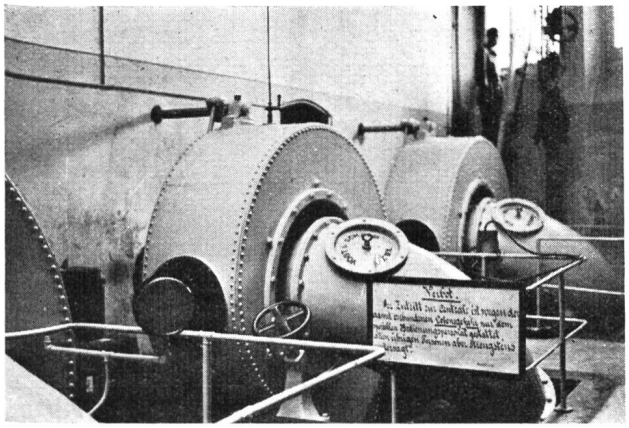

Abb. 1 Anlage mit drei horizontalaxigen Francis-Spiralturbinen, jede gebaut für: Gefälle 8,3 m, Leistung 107 PS, Drehzahl 375 UpM. Gebaut im Jahre 1915.

Die Leistungsverbesserung bestehender Wasserkraft-Anlagen

Von Vizedirektor *J. Moser*, Zürich. *

Am 27. Februar 1942 sprach Obering. E. Meyer, Bern, der vom Bundesrat bestellte Kommissär, an der Mitgliederversammlung des Linth-Limmatverbandes über die Möglichkeiten zur Erhöhung der Produktion der Wasserkraft-Elektrizitätswerke. Seither ist der Bundesratsbeschluss vom 16. Juni 1942 über Massnahmen zur Erhöhung der Produktion der Wasserkraft-Elektrizitätswerke als Ersatz für den Beschluss vom 10. Februar 1942 in Kraft getreten, und es ist mir die Aufgabe gestellt, über die Verbesserungsmöglichkeiten der Wasserturbinenanlagen mich zu äussern. Es ist sehr wichtig, wenn der Turbinenkonstrukteur von den Wasserwerkbesitzern auf Beobachtungen über die Leistungsfähigkeit der Anlage aufmerksam gemacht wird, denn nur durch gegenseitige Unterstützung ist es möglich, eine möglichst rationelle Kraftausnützung zu erreichen. Dabei sind folgende drei Faktoren zu berücksichtigen: 1. das Gefälle, 2. die Wassermenge und 3. der Nutzeffekt. Die beiden ersten Faktoren sind von der Natur aus bedingt, während der dritte Faktor, der Nutzeffekt, vom technischen Können und Willen des Turbinenkonstrukteurs und des hydraulischen Forschungsingenieurs abhängig ist.

Betrachtet man den ersten Faktor, das Gefälle, so ist hier in erster Linie das Verhältnis zwischen dem der Turbine zur Verfügung stehenden Nettogefälle und dem statischen Gefälle, d. h. der Höhendifferenz zwischen Ober- und Unterwasserspiegel vor und nach der Turbine bei deren Stillstand massgebend. Um eine möglichst hohe Verhältniszahl zu erreichen — sie sei als Gefällswirkungsgrad bezeichnet —, sind die Verluste im Zu- und Ablaufkanal möglichst gering zu halten, was durch kleine Geschwindigkeiten und gute Wasserführung zu erreichen ist. Ferner ist darauf zu achten, dass keine zu grossen Durchgangsgeschwindigkeiten durch den Rechen auftreten; der Rechenquerschnitt ist somit

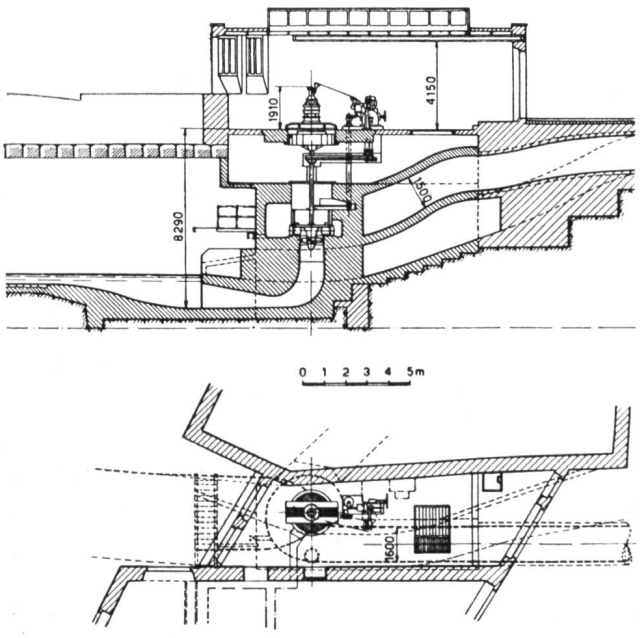

Abb. 2 Ersatz der in Abb. 1 dargestellten drei Spiralturbinen durch eine vertikalaxige direkt mit Generator gekuppelte Kaplanturbine für: Gefälle 6,4—9,1 m, Wassermenge 4500 l/sek, Leistung 311—470 PS, Drehzahl 500 UpM. Gebaut im Jahre 1936.

* Referat, gehalten an der Mitgliederversammlung des Linth-Limmatverbandes vom 26. März 1943 in Zürich. Der Vortragende ergänzte seine Ausführungen durch Lichtbilder, die wichtigeren sind dem Aufsatz in den Abbildungen 1—17 beigegeben.

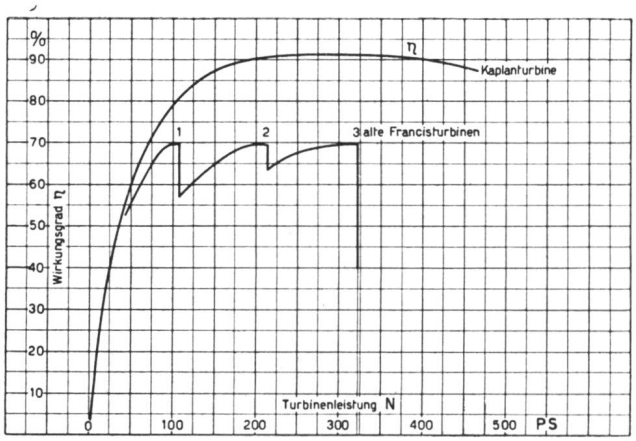

Abb. 3 Nutzeffekt-Diagramm der in Abb. 1 und 2 erwähnten drei Spiralturbinen und der Kaplanturbine. Man beachte den durch den Umbau erzielten Nutzeffektgewinn von mindestens 20 %, da die Zulaufverhältnisse der drei Turbinen sehr ungünstig waren infolge unrichtiger Anordnung der Drosselklappen direkt vor den Einläufen der Spiralgehäuse. Der Gesamtwirkungsgrad der alten Anlage war daher unverhältnismässig niedrig. Der durch Betriebserfahrungen konstatierte Mehrgewinn an Leistung beträgt rund 500 000 kWh, ungefähr 40 % mehr als mit der alten Anlage.

bei nicht allzugrosser Geschwemmselführung des Betriebswassers durch möglichst grosse Lichtweiten zwischen den Rechenstäben auf das Maximum zu bringen. Ausserdem ist für gute Rechenreinigung zu sorgen, was in grössern Anlagen durch die Installation von Rechenreinigungsmaschinen geschehen kann. Die Lichtweite zwischen den Rechenstäben hängt allerdings von der Dimensionierung der Schaufelöffnungen in den Leit- und Laufrädern der Turbine ab, aber die praktischen Verhältnisse haben schon oft gezeigt, dass in dieser Beziehung noch Verbesserungsmöglichkeiten bestehen. Die Aenderung der Turbinentypen kann ebenfalls zu einer Vergrösserung des Rechenquerschnittes führen und damit zu einem bessern Gefällswirkungsgrad.

Bei Hochdruckanlagen, d. h. Turbinenanlagen mit Druckrohrleitungen, ist darauf zu achten, dass die Abzweigstücke richtige Formen erhalten und dass scharfe Krümmungen und plötzliche Querschnittsveränderungen vermieden werden. Der Einbau kugliger oder rechtwinkliger Abzweigungen in Verteilleitungen erzeugt erfahrungsgemäss relativ hohe Druckverluste und hat im weitern eine schädliche Wirkung auf den Gang der Turbinen. Verteilleitungen mit ähnlich eingebauten Abzweigungen sind unbedingt zu ändern und eventuell durch Einbau von Führungskreuzen zu verbessern.

Für den zweiten Faktor, die «Beurteilung der Wassermenge», stellt sich dem Wasserwerkbesitzer die Aufgabe, über den Verlauf der Wassermengen während des Jahres möglichst genaue Aufzeichnungen zu machen. Diese geben dem Konstrukteur die nötigen Anhaltspunkte, den zweckmässigsten Turbinentyp und die richtige Grösse zu bestimmen. Es wird sehr oft der Fehler gemacht, dass wegen der minimalen Wassermengen, die vielleicht nur kurze Zeit während des Jahres auftreten, eine zu kleine Turbinengrösse gewählt wird. Für Wasserkraftanlagen, die an Gewerbekanälen liegen, ist diese Gefahr selbstverständlich weniger gross als für Anlagen, die direkt das Flusswasser ausnützen. Der Wasserturbinenbau hat in den letzten Jahren ausserordentlich grosse Fortschritte gemacht, die die Möglichkeit geschaffen haben, auch bei relativ kleinen Wassermengen noch einen guten Turbinenwirkungsgrad zu sichern, wobei bis zu 25 % der Normalwassermenge bei Freistrahlturbinen und bis zu 30 % bei Kaplanturbinen gegangen werden darf. Es sollte daher jeder Wasserkraftbesitzer in dieser Richtung

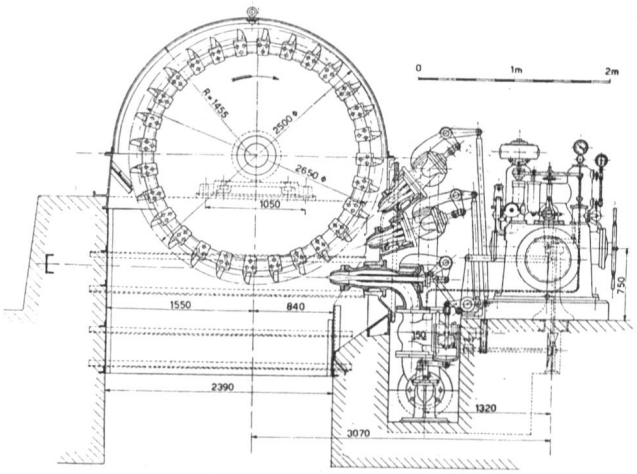

Abb. 4 Freistrahlturbine, gebaut im Jahre 1905, für: Gefälle 550 m, Wassermenge 480 l/sek, Leistung 2750 PS, Tourenzahl 355 UpM. Die Beaufschlagung des Laufrades erfolgt durch drei Einlaufdüsen.

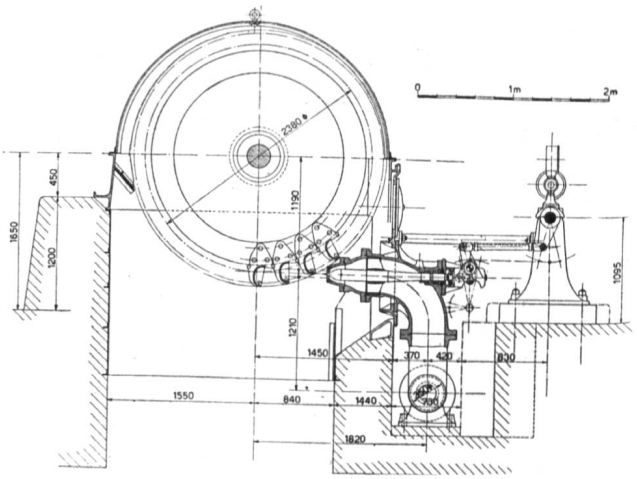

Abb. 5 Obige Turbine, umgebaut im Jahre 1912 für gleiche hydraulische Verhältnisse. Die Beaufschlagung des Laufrades erfolgt mittels einer Düse mit scharfer Krümmung des Einlaufbogens. Bereits wesentliche Verbesserung des Wirkungsgrades gegenüber der mehrdüsigen Anordnung.

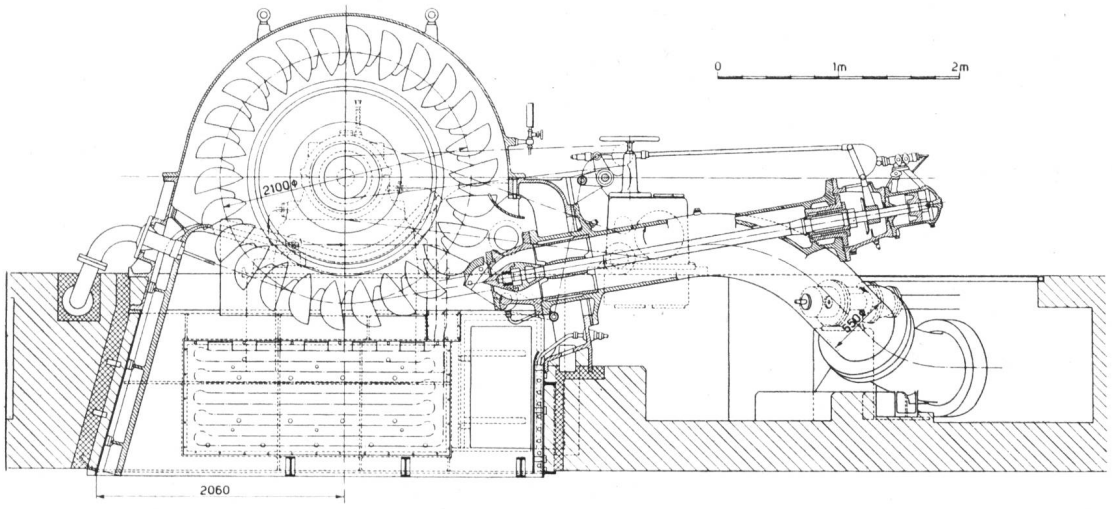

Abb. 6 Freistrahlturbine für: Gefälle 540 m, Wassermenge 1535 l/sek, Leistung 9500 PS, Drehzahl 428 UpM. Diese Turbine wurde als Ersatz von vier alten Turbinen (Abb. 5) im Jahre 1940 aufgestellt. Beaufschlagung des Rades durch eine Düse mit sehr schlankem Einlaufbogen und langem Führungskreuz vor der Einlaufdüse. Gleichzeitig wurden auch die rechtwinkligen Abzweigstutzen in der Verteilleitung durch eine spitzwinklige Abzweigung mit besserer Wasserführung ersetzt.

die nötigen Erhebungen machen, da dadurch wesentliche Leistungserhöhungen zu erreichen sind. Beobachtungen und Ueberwachungen an Flusswehren und Ueberfällen sowie genaue Aufzeichnungen über diese Beobachtungen während des Jahres können dem Wasserkraftbesitzer bedeutende Vorteile bringen.

Als dritter Faktor sei der «Nutzeffekt einer Turbinenanlage» behandelt. Hier sind der mechanische und der hydraulische Wirkungsgrad voneinander zu unterscheiden. Der mechanische Wirkungsgrad ist zu verbessern durch Reduktion der Lagerreibungen durch Anwendung des direkten Antriebes, wie beispielsweise direkte Kupplung mit einem Generator und Vermeidung von alten Zahnrädern mit Holz auf Eisen laufenden und ungenügend geschmierten Zähnen, Transmissionen, Seiltrieben und dergleichen. Die fortschreitende Entwicklung der Kraftübertragung mittels elektrischer Energie besitzt in dieser Beziehung wesentliche Vorteile und hat die früher verwendeten Königsstöcke, Transmissionen und Zahnradantriebe zum grossen Teil zum Verschwinden gebracht, doch dürfte noch eine ansehnliche Zahl solcher Antriebe vorhanden sein, die verbesserungsfähig sind. Sind Uebersetzungen nicht zu umgehen, so sind heute Kettenantriebe und Zahnradgetriebe mit geschliffenen und automatisch geschmierten Zähnen in der Lage, die Reibungsverluste wesentlich herabzusetzen und den mechanischen Wirkungsgrad zu verbessern. Auch die neuesten Spurlagertypen mit ihren beweglichen Segmenten bringen schätzenswerte Verbesserungen.

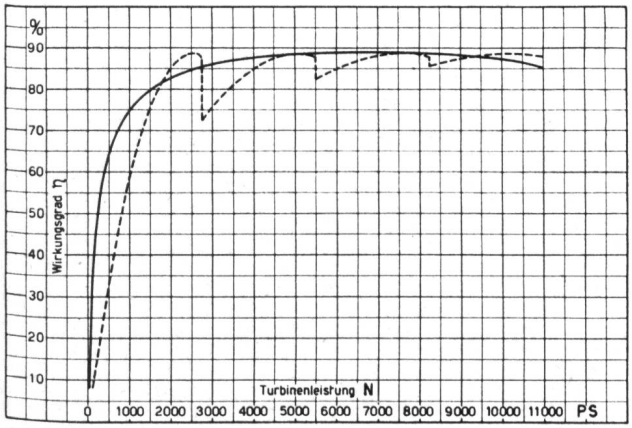

Abb. 7 Nutzeffektverlauf der vier alten Turbinen und der neuen umgebauten Turbine entsprechend Abb. 6. Beachtenswert ist der ausserordentlich günstige Verlauf der Nutzeffektkurve der neuen Turbine und der Gewinn an Nutzeffekt bei ganz kleiner Belastung gegenüber einer alten Maschine. Ausserdem wird durch die Zusammenfassung der Leistungserzeugung in einer Gruppe eine wesentliche Ersparnis an Reserveteilen erzielt und eine vereinfachte Betriebsführung erreicht.

Durch Forschung in den hydraulischen Laboratorien ist es gelungen, auch für den hydraulischen Wirkungsgrad sowohl für die Aktions- wie Reaktionsturbinen einen möglichst günstigen Verlauf zu erhalten. In dieser Beziehung stehen die Kaplan- wie auch die Freistrahlturbinen an erster Stelle, während die Francisturbinen bei Teillasten gegenüber den beiden vorerwähnten Turbinentypen im Nachteil sind. Für Niederdruckanlagen mit stark variabler Wassermenge und Gefälle ist die Kaplanturbine der Francisturbine entschieden überlegen. Die Kaplanturbine hat den weitern Vorzug, grosse Durchgangsöffnungen zu besitzen, die wiederum die Möglichkeit geben, die Rechenlichtweite zu erhöhen und somit auch den

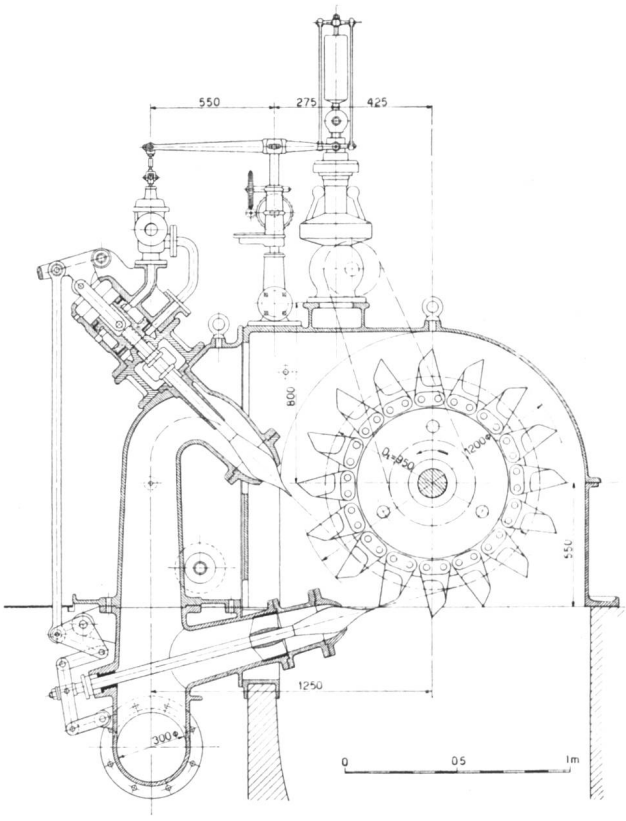

Abb. 8 Doppeldüsige Freistrahlturbine, gebaut im Jahre 1905, für: Gefälle 80 m, Wassermenge 300 l/sek, Leistung 250 PS, Tourenzahl 375 UpM. Man beachte die scharfe, hydraulisch ungünstige Umlenkungsform des obern Einlaufkrümmers.

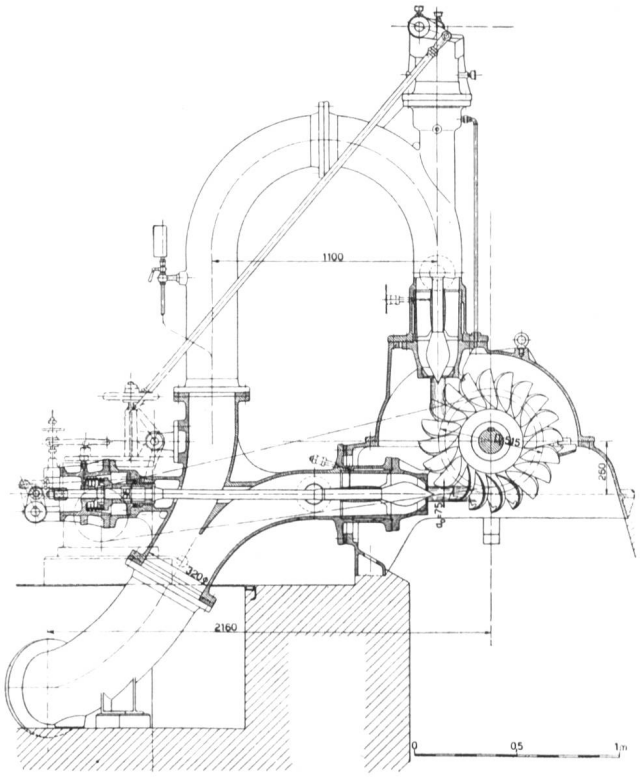

Abb. 9 Zweidüsige Freistrahlturbine, Baujahr 1938, für ähnliche Verhältnisse wie die Turbine gemäss Abb. 8: Gefälle 92,5 m, Wassermenge 346 l/sek, Leistung 350 PS, Drehzahl 720 UpM. Fortschritt erkennbar in schlankem Zulaufbogen, langen Führungskreuzen und doppelter Drehzahl, somit auch doppelter spezifischer Schnelläufigkeit. Nutzeffektgewinn mindestens 8% im Scheitelpunkt und bis 12% und mehr bei Teillasten. Wesentliche Verbesserungen auch in der Ausbildung der Laufradschaufelform erkennbar.

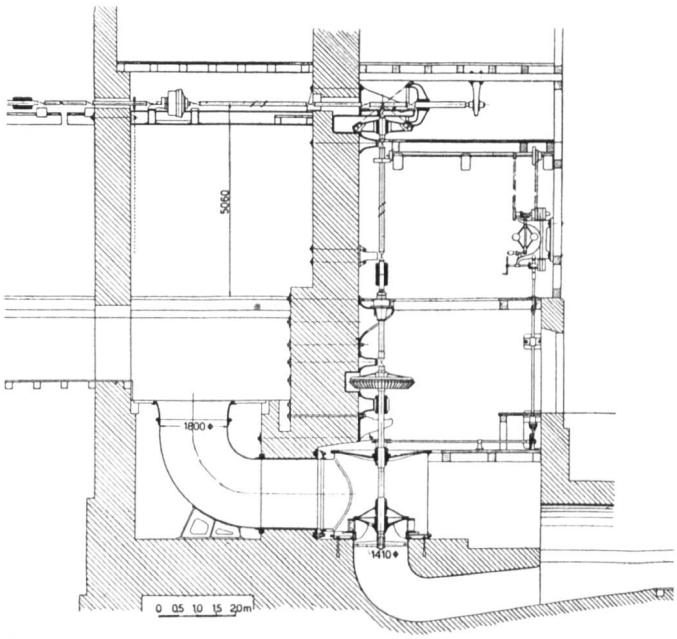

Abb. 10 Vertikalaxige Francisturbine mit Blechgehäuse, gebaut im Jahre 1904, für: Gefälle 6,4 m, Wassermenge 3800 l/sek, Leistung 250 PS, Drehzahl 95 UpM. Diese Turbine diente zum Antrieb einer Spinnerei mittels Transmission.

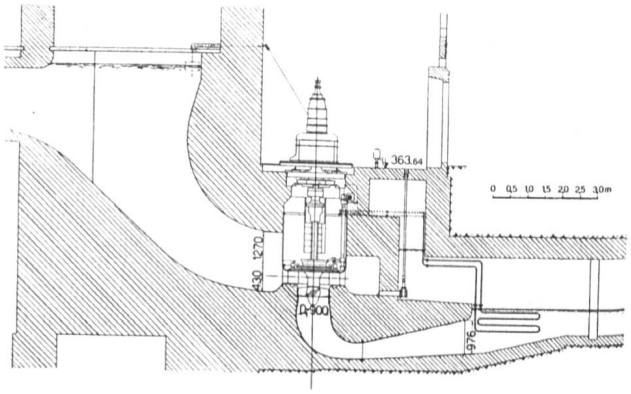

Abb. 11 Ersatz der in Abb. 10 genannten Francisturbine durch eine vertikalaxige Kaplanturbine, direkt gekuppelt mit einem Drehstromgenerator und gebaut im Jahre 1941, für: Gefälle 6,5 m, Wassermenge 4200 l/sek, Leistung 306 PS, Drehzahl 428,6 UpM. Erhöhung der Leistung um 22,5%.

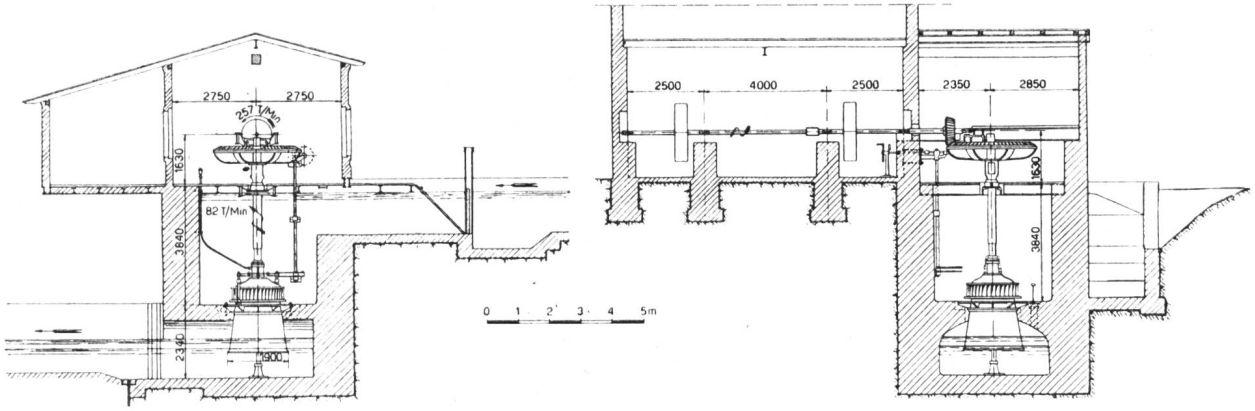

Abb. 12 Vertikalaxige Francisturbine mit Kegelradübersetzung und Transmissionsantrieb, gebaut im Jahre 1905, für: Gefälle 4,5—4,8 m, Wassermenge 3600—2100 l/sek, Leistung 166—103 PS, Drehzahl 82 UpM.

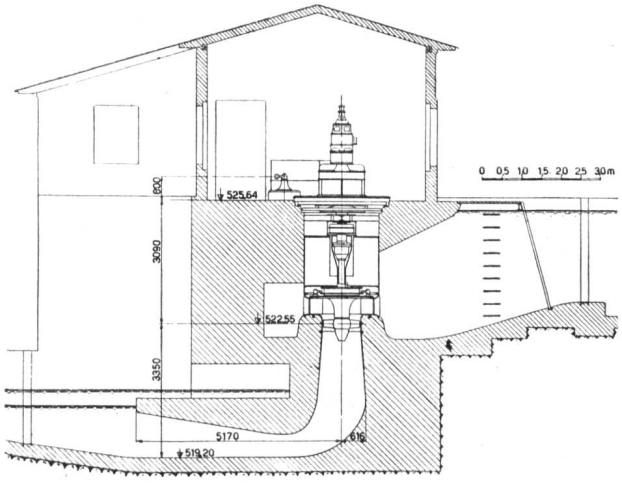

Abb. 13 Ersatz der in Abb. 12 genannten Turbine durch eine vertikalaxige Kaplanturbine mit direkter Kupplung des Generators, gebaut für: Gefälle 4,5 m, Wassermenge 4400 l/sek, Leistung 222 PS, Drehzahl 300 UpM. Leistungserhöhung zirka 34%.

Rechenverlust zu vermindern. Sie erfordert allerdings gegenüber der Francisturbine in erhöhtem Masse eine besondere Ausbildung der Turbinenkammer und des Turbinensaugrohres und muss im allgemeinen tiefer gesetzt werden. In den Zuleitungskanälen sind ebenfalls scharfe Umlenkungen zu vermeiden, um die Bildung von Wirbeln, die sich bis in die Turbine fortbewegen können, zu verhindern. Es ist nachgewiesen, dass solche Wirbel sich auf den Nutzeffekt der Turbine ungünstig auswirken, selbst wenn die Zulaufgeschwindigkeiten relativ gering sind.

In der heutigen Zeit der Knappheit der elektrischen Stromversorgung muss es sich jeder Wasserkraftbesitzer zur Pflicht machen, die Verhältnisse seiner Wasserkraft einer genauen Prüfung zu unterziehen und einen Fachmann beizuziehen, um zu untersuchen, ob in seiner Anlage das Maximum an Leistung bereits herausgeholt wird, oder welche Massnahmen zu treffen sind, um dieses Ziel zu erreichen. Ganz allgemein kann gesagt werden, dass es sich auf alle Fälle lohnt, Wasserkraftanlagen mittlerer und kleiner Leistungen, deren Turbinen vor oder kurz nach Beginn dieses Jahrhunderts in Betrieb gekommen sind, umzubauen, um so mehr, als Forschungen auf Grund ausgedehnter Laboratoriumsversuche dazu geführt haben, dass auch für solche Anlagen im Scheitelpunkt der Wirkungsgradkurve Werte bis über 90 % erreicht werden, also durchschnittlich 5 bis 10 % mehr als mit den alten Turbinen. Bei Teillasten ändern sich die Verhältnisse noch wesentlich mehr zugunsten der modernen Turbinen, indem die Differenz bis über zwanzig und mehr Prozent anwachsen kann.

Eine weitere Pflicht für den Wasserkraftbesitzer besteht in einer periodischen Kontrolle seiner Turbinenanlage, die er unbedingt durch einen Fachmann vorzunehmen hat. Das vielfach sandführende Betriebswasser verursacht im Laufe der Zeit unbedingt eine Abnützung der im Wasser laufenden Turbinenteile. So zeigt die Erfahrung, dass bei Freistrahlturbinen die Düsen und Nadeln nach bestimmten Betriebsperioden Erosionsrillen aufweisen, die eine Streuung des Wasserstrahles verursachen und seine Kompaktheit in ungünstiger Weise beeinflussen. Diese bewirkt einerseits eine Einbusse an Nutzeffekt und somit auch an Leistung, anderseits — je nach den Verhältnissen — Korrosionen an den Laufradschaufeln und deren raschere Abnützung. Durch rechtzeitige Korrektur und Ueberholung kann somit auch hier an Leistung gewonnen und Betriebsausgaben gespart werden, denn sehr oft kann durch Nacharbeiten oder Nachschweissungen der eine oder andere Teil für eine neue Betriebsperiode gerettet werden ohne sofortigen Ersatz.

Aehnlich verhält es sich auch mit den Francisturbinen, deren Laufradspaltspiele unbedingt nachzukontrollieren sind. Bei wachsendem Spiel erhöht sich der Spaltwasserverlust, der wiederum eine Einbusse an Nutzeffekt und Leistung hervorruft. Diesen Erfahrungen ist in neuerer Zeit dadurch Rechnung getragen, dass alle modernen Francisturbinen mit auswechselbaren Spaltringen und Leitradschutzwänden versehen sind. Turbinen älteren Herstellungsdatums lassen sich ohne weiteres auch in dieser Beziehung verbessern. Es sind zum Beispiel Fälle konstatiert worden, wo alte Turbinenanlagen Spaltspiele bis zu 10 mm aufwiesen, ohne dass vorher eine richtige Kontrolle und Korrektur vorgenommen wurde. Es besteht sehr oft die Ansicht, dass eine Turbine auch in hydraulischer Richtung in Ordnung gehe, wenn sie mechanisch gut laufe. Die übermässigen Spaltspiele wirken sich besonders bei Teillasten durch empfindliche Leistungsverminderungen aus, die bei Transmissionsantrieben oft nicht sofort erkannt werden. Daher sind periodische Revisionen empfehlenswert, die den Wasserkraftbesitzer vor solchen wirtschaftlichen Einbussen schützen. Im übrigen fehlt es auch sehr oft an der nötigen Aufklärung und der richtigen Auffassung über die hydraulischen Vorgänge und den Charakter der Turbinen, die den Wasserkraftbesitzer viel zu spät den wirtschaftlichen Verlust erkennen lassen, der ihm durch rechtzeitige Erkenntnis der Dinge hätte erspart werden können.

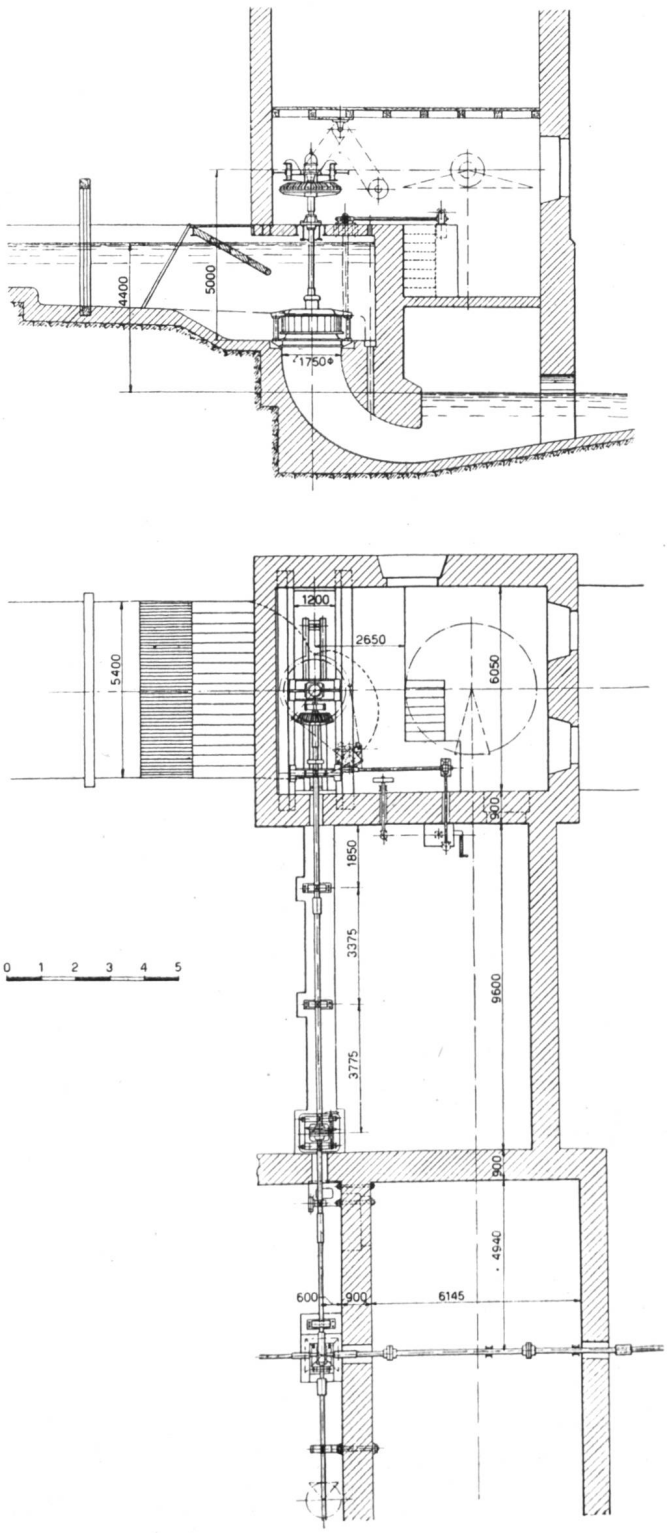

Abb. 14 Anlage mit eingebauter Francisturbine, vertikale Wellenanordnung und Fabrikantrieb mittels Kegelradübersetzung und Wellentransmission, gebaut im Jahre 1909, für: Gefälle 4,4 m, Wassermenge 5000 l/sek, Leistung 220 PS, Drehzahl 100 UpM.

Es ist klar, dass in bezug auf die Wirtschaftlichkeit umzubauender Turbinen die baulichen Verhältnisse mit zu berücksichtigen sind; aber in den letzten Jahren ist allgemein die Erkenntnis durchgedrungen, dass selbst bei relativ hohen Baukosten der erhöhte Kraftgewinn den Umbau rechtfertigt. Beim Vergleich einer Anzahl kleinerer und mittlerer Anlagen, variierend von 50 bis 600 PS, die von der Firma Escher Wyss in den letzten fünf bis sechs Jahren umgebaut wurden, ergab sich eine Leistungserhöhung von rund 60 %. Es handelt sich dabei um 35 Anlagen, deren Gesamtleistung von 5838 auf 9506 PS erhöht wurde. Der Anteil an der Erhöhung der Wassermenge beläuft sich auf ungefähr 34 %, die mittlere Gefällserhöhung beträgt etwa 10 % und die Nutzeffekterhöhung ca. 8 %. Diese Zahlen sind Mittelwerte, während in einzelnen Fällen Gefällserhöhungen bis zu 50 und 80 % vorgenommen wurden und Wassermengenerhöhungen bis zu 80 %, in einem Falle sogar bis über 200 %.

Die bisherigen Betriebsresultate haben überall befriedigt, und trotz den teilweise erheblichen Baukosten scheinen die vorgenommenen Umbauten wirtschaftliche Vorteile gebracht zu haben. An alle Wasserkraftbesitzer ergeht deshalb der Appell, sich vor Augen zu halten, dass durch jede gewonnene Kilowattstunde weisser Kohle eine entsprechende Menge eingeführter schwarzer Kohle gespart wird.

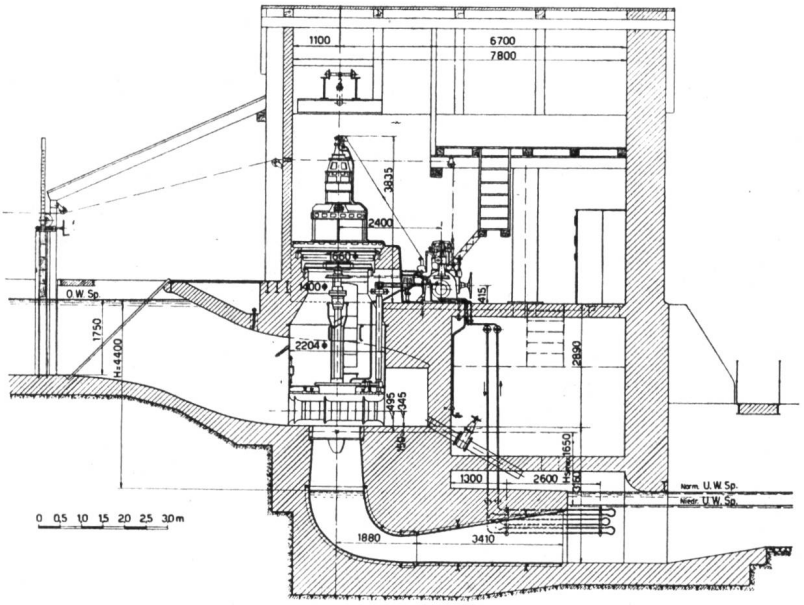

Abb. 15 Gleiche Anlage wie in Abb. 14, dagegen mit Einbau einer modernen vertikalaxigen Kaplanturbine zum direkten Antrieb eines vertikalaxigen Generators. Baujahr 1942. Diese Turbine ist ebenfalls für ein Gefälle von 4,4 m und eine Wassermenge von 5000 l/sek gebaut, gibt dagegen durch Verbesserung des Wirkungsgrades eine Leistung von 250 PS bei 300 UpM. ab. Der Einbau dieser Turbine ergibt somit eine Leistungsverbesserung von rund 14 % und eine dreifache Drehzahlerhöhung.

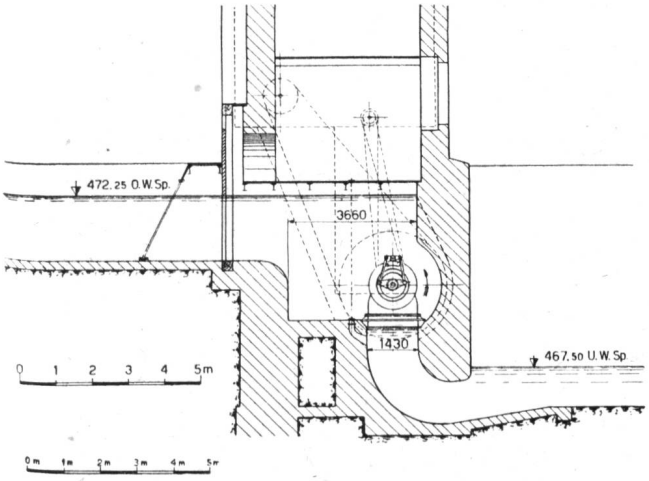

Abb. 16 Horizontalaxige Francis-Zwillingsturbine, gebaut im Jahre 1906, für: Gefälle 4,75 m, Wassermenge 3600 l/sek, Leistung 176 PS, Drehzahl 160 UpM. Die Turbine treibt mittels Riementübersetzung eine Fabriktransmission an.

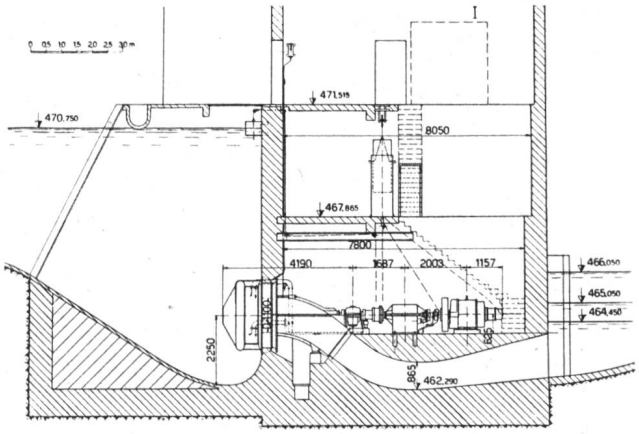

Abb. 17 Ersatz der in Abb. 16 gezeigten Turbine durch eine horizontalaxige Kaplanturbine mit Antrieb des Generators durch Spezialstirnradgetriebe. Diese Turbine ist gebaut für: Gefälle 4,7—5,7 m, Wassermenge 3460—5700 l/sek, Leistung 193—360 PS, Drehzahl 233—383 UpM. Auf Anregung des Wasserkraftbesitzers wurden die Turbinendimensionen für beste Ausnützung kleiner und kleinster Wassermengen gewählt. Dank des Spezialgetriebes der S. L. W. kann durch stufenweise Steigerung der Turbinendrehzahl der Wasserdurchlass der Turbine nach Bedarf bis zu 44 % und damit deren Leistung um 65 % gesteigert werden. Man beachte ferner die hydraulisch günstige Form des Turbinenauslaufes.