Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 68 (1950)
Heft: 32

Artikel: Francis- oder Pelton-Turbine?
Autor: Weingart, Ch.
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-58057

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: 11.12.2025

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

68. Jahrgang Nachdruck von Bild oder Text nur mit Zustimmung der Redaktion und nur mit genauer Quellenangabe gestattet Nr. 32

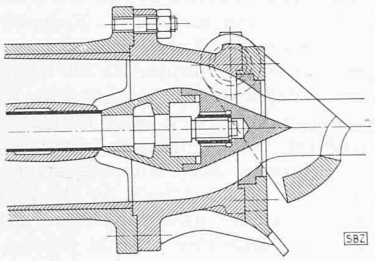
Francis- oder Pelton-Turbine?

Von Dipl. Ing. CH. WEINGART, Zürich DK 621.241.2 : 621.242.4

Die bedeutenden Fortschritte, die in den letzten Jahren im Bau grosser Francisturbinen gemacht worden sind, haben es ermöglicht, diese Turbinenart auch bei hohen Gefällen (bis über 400 m) zu verwenden. Damit stellt sich bei der Projektierung eines Hochdruck-Kraftwerkes öfters die Frage, ob der Francis- oder der Pelton-Turbine der Vorzug gegeben werden soll. Zu dieser Frage haben sich verschiedene Turbinenfirmen des In- und Auslandes in der letzten Zeit geäussert, und so dürfte es den Fachmann interessieren, auch die Ansicht der Firma Escher Wyss A.-G. in Zürich darüber zu vernehmen.

Auf die in jedem einzelnen Fall durchzuführende rechnerische Untersuchung braucht nicht näher eingetreten zu werden. Diese Berechnungen werden zeigen, ob an und für sich die Möglichkeit besteht, sowohl die eine als auch die andere Turbinenart zu verwenden. In Richtung des höheren Gefälls wird der Verwendung der Francisturbine aus folgendem Grund eine Grenze gesetzt: Einerseits darf die Drehzahl mit Rücksicht auf die Festigkeit des Generatorrotors einen bestimmten Wert nicht überschreiten. Damit ist der Laufrad-Durchmesser weitgehend festgelegt. Um einen guten Turbinenwirkungsgrad zu erzielen, darf anderseits das Verhältnis der Schaufelbreite zum Laufraddurchmesser nicht zu klein sein.

Die Verwendbarkeit der Peltonturbine wird in der Richtung kleiner Gefälle nach den bisherigen Erfahrungen der Firma Escher Wyss durch die vierdüsige Anordnung (entweder horizontale Ausführung mit zwei Rädern mit je zwei Düsen oder vertikale Ausführung mit einem Rad und vier Düsen) begrenzt. Wohl liegen, wie bekannt, vertikalachsige Ausführungen von Peltonrädern mit fünf oder sechs Düsen vor, jedoch sind die mit solchen Maschinen bisher gemachten Erfahrungen so unsicher, dass solche Ausführungen noch nicht empfohlen werden können. Die Hauptnachteile solcher vieldüsiger Turbinen liegen unserer Ansicht nach in der gegenseitigen Störung der Wasserstrahlen, die einen ungünstigen Einfluss auf den Wirkungsgrad sowie auch auf die Abnutzung der Schaufeln ausüben muss; ferner auch in der Schwierigkeit, das aus dem Laufrad entweichende Wasser durch den durch die Konstruktion bedingten verhältnismässig kleinen Gehäusequerschnitt abzuführen.



1. Widerstandsfähigkeit gegen Abnutzung

Auf die Kavitationsgefahr braucht hier nicht näher eingetreten zu werden, wird es doch bei Francisturbinen fast immer möglich sein, durch richtige Wahl der Höhenlage der Turbine und durch Verwendung entsprechender Materialien die Kavitation praktisch zu eliminieren oder zum mindesten in die gleichen Grenzen zu bringen wie bei Peltonturbinen. Allerdings wird die Tieferlegung der Turbine in der Regel vermehrte Aushubarbeiten und kostspieligere Fundamente verursachen, worauf später noch hinzuweisen sein wird.

Was die Abnutzung durch Erosion anbetrifft, so muss zunächst festgestellt werden, dass die von Befürwortern der Peltonturbine erwähnten Fälle mit stark sandhaltigem Wasser für einen Vergleich beider Turbinenarten nicht geeignet sind. Dem Angriff von solchem Wasser kann weder die Peltonturbine noch die Francisturbine standhalten; viel mehr muss in solchen Fällen sowohl bei der einen als auch bei der andern Turbinenart das Wasser durch Einbau von Entsandungsanlagen weitgehend gereinigt werden.

Die der Einwirkung des Wassers hauptsächlich ausgesetzten Teile sind bei der Peltonturbine die Düseneinsätze, die Nadelspitzen und die Laufradschaufeln; bei der Francisturbine die oberen und unteren Schutzringe des Leitapparates, die Leitschaufeln, die oberen und unteren feststehenden und rotierenden Dichtungsringe und die Laufradschaufeln.

Bei der Peltonturbine sind die Düsen und Nadeln der Einwirkung des Wassers ausgesetzt, das mit der Geschwindigkeit, die der vollen Gefällshöhe entspricht, ausströmt. Bei der Francisturbine strömt das Wasser durch den Leitapparat, insbesondere bei hohen Belastungen, mit einer zum Teil ganz bedeutend kleineren Geschwindigkeit. Da die Abnützung mit der Wassergeschwindigkeit zunimmt, muss sich daraus schon rein theoretisch eine raschere Abnutzung der Düsen und Nadeln in einer Peltonturbine als der Schutzringe des Leitapparates und der Leitschaufeln in einer Francisturbine ergeben.

Als ungünstiger Umstand bei der Peltonturbine tritt noch hinzu, dass die Abnützung der der Einwirkung des Wassers ausgesetzten Teile sich bei dieser Turbine nachteiliger in bezug auf den Wirkungsgrad auswirkt als bei der Francisturbine. Schon kleine Rauhigkeiten an Düsen und Nadeln bewirken eine starke Störung des Strahls, die sich in einer entsprechenden Verminderung des Wirkungs-

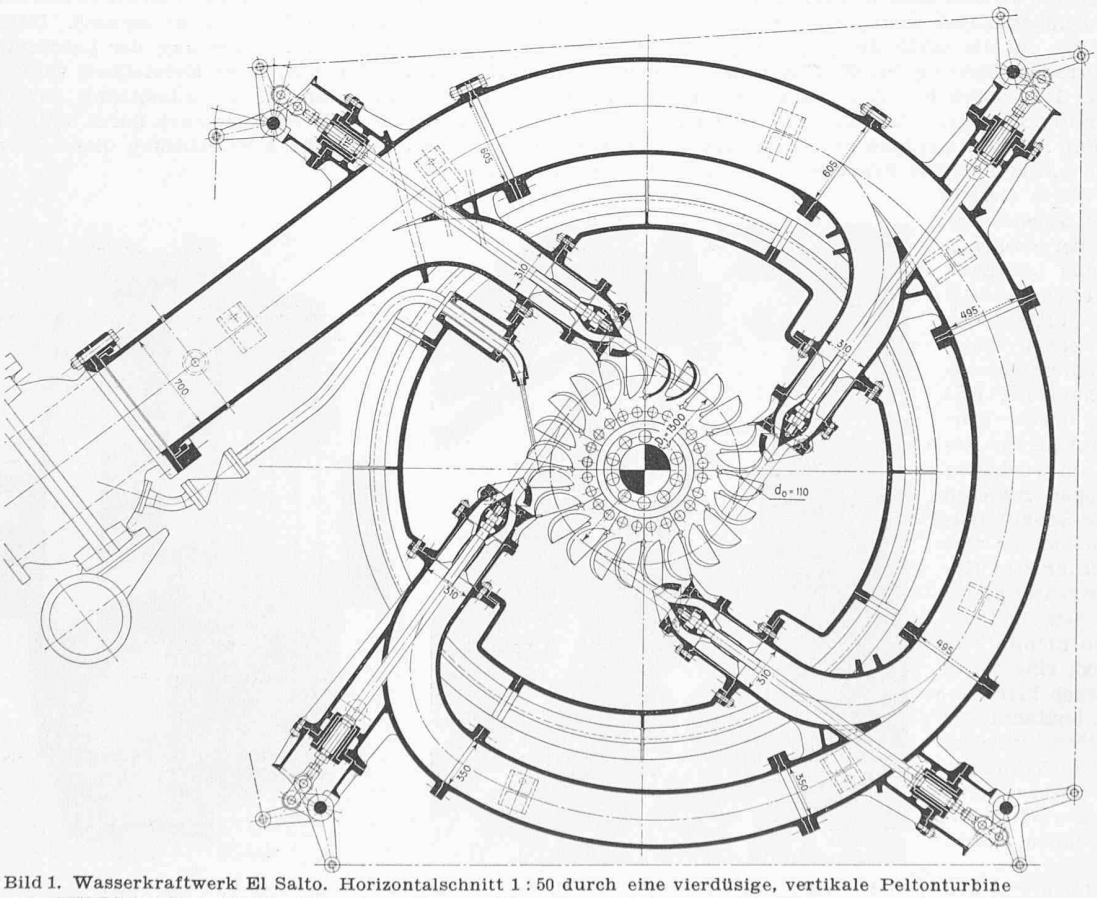


Bild 1. Wasserkraftwerk El Salto. Horizontalschnitt 1 : 50 durch eine vierdüsige, vertikale Peltonturbine von 13 550 PS bei 394 m Nettogefälle, oben Düse und Regulierspindel, Masstab 1: 15

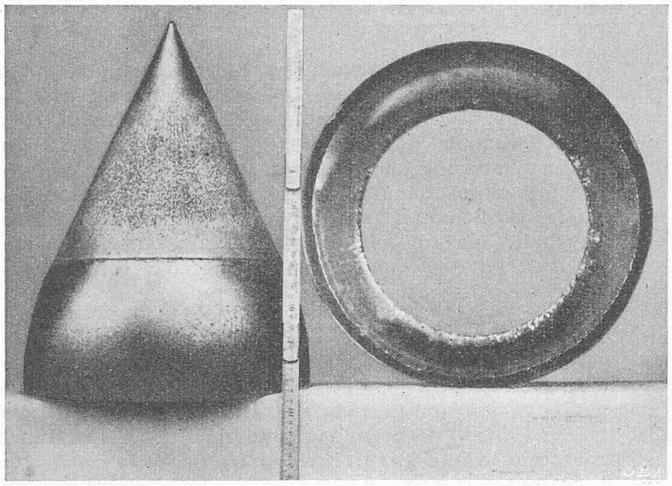


Bild 3. Wasserkraftwerk Handeck I. Abgenutzte Nadelspitze mit zugehörigem Düseneinsatzring einer vertikalen Peltonturbine von 30 000 PS bei 540 m Nettogefälle

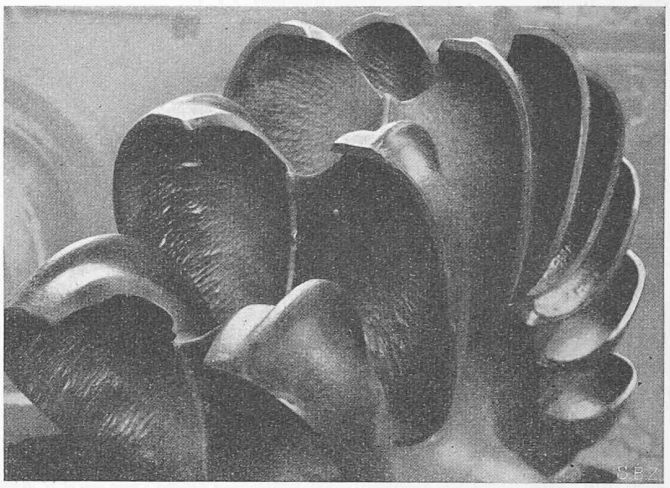


Bild 4. Abgenutztes Laufrad einer Peltonturbine bei sandhaltigem Wasser

grades auswirkt, nicht zu reden von der dadurch hervorgerufenen schädlichen Erosionswirkung auf die Laufradschaufeln.

Einen guten Einblick in die Verhältnisse bei der Peltonturbine gibt eine im «Bulletin des SEV» Jg. 1943, Heft Nr. 13, erschienene Abhandlung von F. Aemmer über von ihm an Peltonturbinen von 30 000 PS bei 540 m Gefälle durchgeführte Untersuchungen[1]), aus welchen einerseits die verhältnismässig rasche Abnützung der Düsen und Nadeln, anderseits die schädliche Wirkung kleiner Abnützungen auf die Arbeitsweise der Turbinen hervorgeht (Bild 3).

Auch für die Abnützung der Laufradschaufeln ist die verhältnismässige Geschwindigkeit des Wassers in den Schaufeln massgebend, die bei Peltonturbinen im Vergleich zur Francisturbine wesentlich höher ist. Ein weiterer in dieser Beziehung zu Gunsten der Francisturbine sprechender, öfters beobachteter Umstand ist die gleichmässige Art der Abnützung, bei der das Profil der Schaufeln nur wenig deformiert wird. Sie rührt von der gleichmässigeren Verteilung der Wassergeschwindigkeit über die Schaufelfläche her. Peltonturbinenschaufeln weisen demgegenüber wellenförmige Anfressungen auf, die zum Teil auf die durch die Abnützung der Düsen und Nadeln verursachte Störung des Strahls, zum Teil aber auch auf die beim Eingreifen des Ablenkers vorübergehend eintretende Streuung zurückzuführen sind (Bild 4).

Als interessanten Fall möchten wir eine von Escher Wyss erbaute Anlage erwähnen, die mit drei Francisturbinen von je rund 25 000 PS bei 260 m Gefälle ausgerüstet ist, und bei welcher der Bau der ursprünglich vorgesehenen Entsandungs-Anlage aus gewissen Gründen unterlassen werden musste. Infolge des zeitweise auftretenden ganz ausserordentlich hohen Sandgehaltes, bei dem es sich um scharfkantige Granitkörner handelte, trat eine starke Abnützung dieser Turbinen auf, die zur Vornahme von Reparaturen zwang. Als am wenigsten in Mitleidenschaft gezogen erwiesen sich dabei die Laufrad-Schaufelkanäle, bei denen sich sowohl an den Schaufelseiten als auch an den Kanalböden eine regelmässige und glatte Erosion zeigte. Nur an den Austrittstellen aus den Kanälen konnte, wie aus Bild 5 ersichtlich ist, eine unregelmässigere, freilich auch hier verhältnismässig geringe Abnutzung der Laufradscheibe beobachtet werden.

Als Beispiel für das Verhalten einer unter normalen Wasserverhältnissen betriebenen Hochdruck-Francisturbine sei auf die bei einem Nettogefälle von 374 m arbeitende Turbine von 14 620 PS des Kraftwerks Bitto (Italien) hingewiesen, die sich seit Anfang 1944 fast ununterbrochen in Betrieb befindet. Die Bilder 6 und 7 zeigen den tadellosen Zustand, in dem sich die Laufradschaufeln und die rotierenden Dichtungsringe nach einer Betriebsdauer von etwa 33 000 Stunden noch befanden.

Bei Francisturbinen sind die Labyrinthringe am meisten der Abnützung unterworfen, die das Laufrad gegen den Turbinendeckel und gegen den Saugstutzen abdichten. Entsprechende Teile weist die Peltonturbine nicht auf, was als Vorteil dieser Turbinenart angesehen werden muss. Es ist leicht einzusehen, dass das mit beträchtlicher Geschwindigkeit durch die Spalträume entweichende sandhaltige Wasser eine Abnützung dieser Ringe und dadurch infolge des vergrösserten Spaltverlustes eine Verschlechterung des Wirkungsgrades hervorrufen muss. Aber gerade aus diesem Grund ist die Aufmerksamkeit der Turbinenkonstrukteure ganz besonders auf diese empfindliche Stelle der Francisturbine gelenkt worden, um durch möglichste Eliminierung dieses Nachteils den dieser Turbinenart zukommenden Vorrang zu sichern. Durch passende Dimensionierung und Formgebung der Labyrinthringe und geeignete Wahl der zu ihrer Herstellung verwendeten Materialien ist es gelungen, die Abnützung auf ein Minimum zu reduzieren, daneben aber auch durch entsprechende Konstruktion eine rasche Auswechslung dieser Ringe zu ermöglichen.

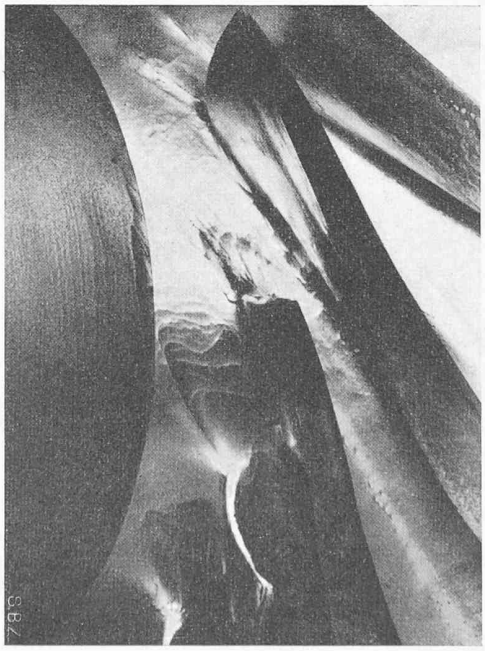


Bild 5. Abgenutztes Laufrad einer Francisturbine ohne Aussenkranz bei stark sandhaltigem Wasser

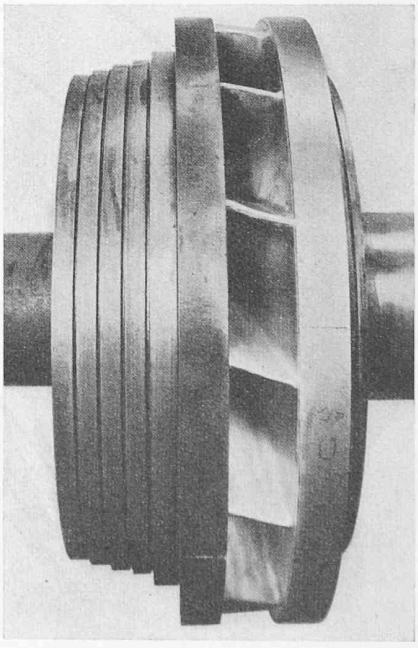


Bild 6. Gleiches Rad wie Bild 7

[1]) Vgl. auch SBZ, Bd. 126, S. 6* (7. Juli 1945), speziell Bild 8.

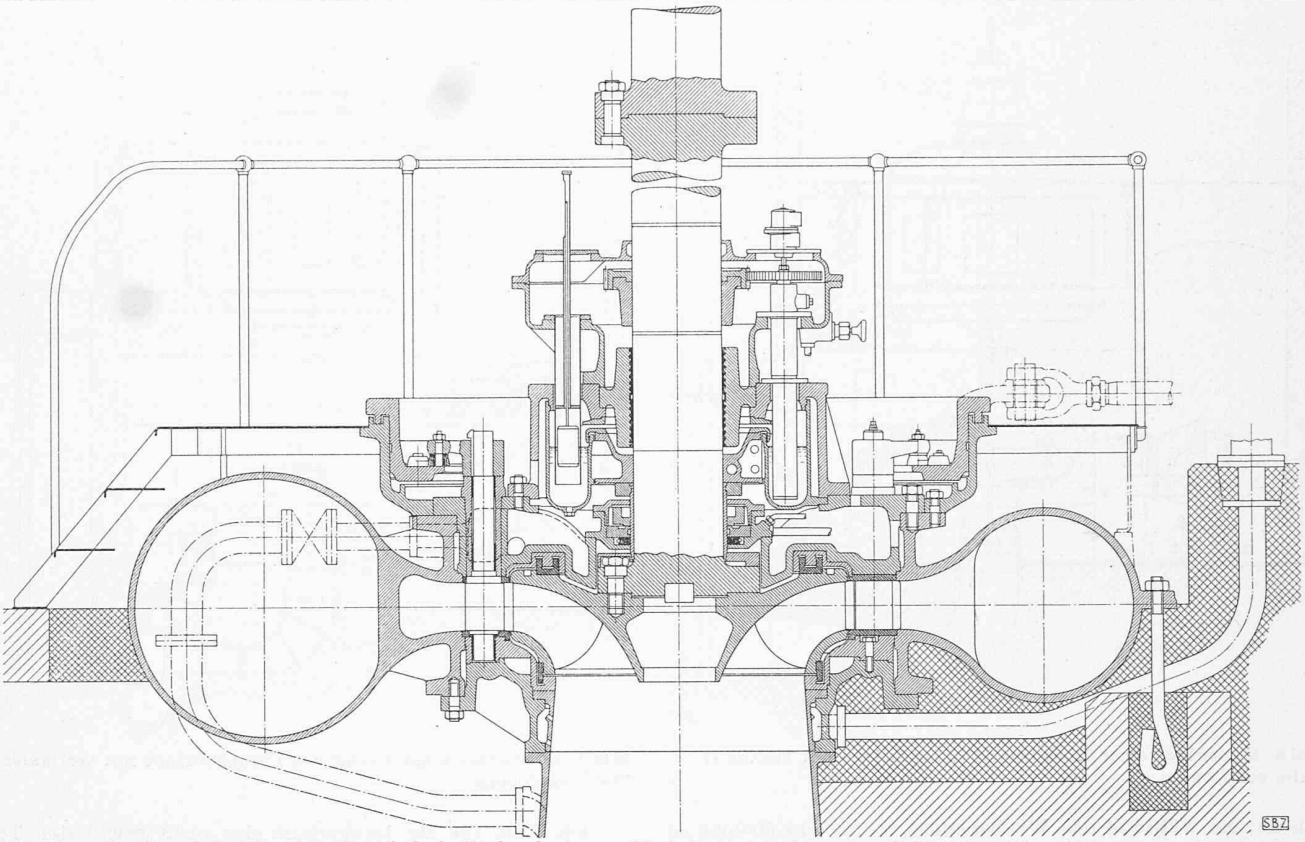


Bild 2. Wasserkraftwerk Las Conchas. Vertikalschnitt durch eine vertikale Francisturbine von 16 230 PS bei 200 m Nettogefälle. Masstab 1 : 25

Uebrigens ist in diesen Bestrebungen, die Konstruktion der Francisturbine weiter zu verbessern, das letzte Wort noch nicht gesprochen worden. Es sei beispielsweise auf die Möglichkeit hingewiesen, die Labyrinthringe aus Gummi herzustellen oder sandfreies Sperrwasser einzuführen, durch welches das Eindringen des sandhaltigen Betriebswassers zwischen die Dichtungsstellen erschwert wird.

Leider ist es ausserordentlich schwer, anhand von Erfahrungen an ausgeführten Anlagen das relative Verhalten beider Turbinenarten hinsichtlich Abnützung statistisch und zahlenmässig zu demonstrieren, indem Berichte über Betriebsergebnisse oder einwandfreie Versuche nur in geringer Zahl vorliegen, auf Grund derer ein richtiger Vergleich beider Turbinenarten angestellt werden könnte. Immerhin zeigen diese Ergebnisse, dass sich die Abnützung der Francisturbinen, insbesondere diejenige der Labyrinth- oder Schutzringe, weniger ungünstig auswirkt, als angenommen wurde. Als charakteristischer Fall sei eine Anlage erwähnt, in der zwei der vier im ganzen vorgesehenen Francisturbinen von je 66 200 PS bei 346 m Gefälle seit etwa sechs Jahren in Betrieb stehen. Die an einer der Gruppen nach rd. 15 000 Betriebsstunden durchgeführten Versuche haben folgende Wirkungsgrade ergeben, wobei zu berücksichtigen ist, dass die spezifische Drehzahl dieser Turbinen sehr niedrig ist:

Belastung:	68520	64190	58310	49720	41420	34050	27630 PS
Wirkungsgrad:	88,25	89,60	90,00	89,25	86,95	83,52	79,75 %

Leider waren bei der Inbetriebsetzung der Anlage keine Wirkungsgradversuche durchgeführt worden, so dass es nicht möglich ist, sich ein genaues Bild über die im Laufe einiger Jahre eingetretene Wirkungsgrad-Verschlechterung zu machen. Soviel kann aber gesagt werden, dass die gemessenen Wirkungsgrade der seinerzeit garantierten Wirkungsgradkurve von Vollast bis Halblast folgen und nur im maximalen Gebiet um rd. 0,5 % tiefer als diese liegen.

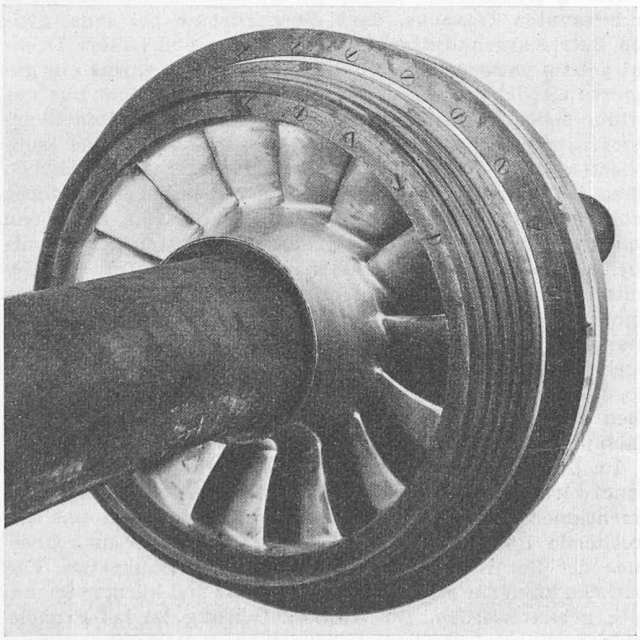


Bild 7. Wasserkraftwerk Bitto. Laufrad einer Francisturbine von 14 620 PS bei 374 m Nettogefälle nach 33 000 Betriebstunden

2. Reparaturmöglichkeit der der Abnützung unterworfenen Teile

Bei der Peltonturbine werden Düsen und Nadeln so konstruiert, dass sie leicht demontiert und gegen in Reserve gehaltene Ersatzstücke ausgewechselt werden können. Am Laufrad können leichte Beschädigungen an den Schaufeln durch Schmirgeln und Aufschweissen repariert werden, ohne dass das Laufrad herausgenommen werden muss. Treten hingegen schwerere Beschädigungen auf, so bleibt nichts anderes übrig, als das Laufrad zu entfernen und durch ein Reservelaufrad zu ersetzen. Die Reparatur des beschädigten Laufrades kann dann mit der nötigen Gründlichkeit und ohne Betriebsunterbruch vorgenommen werden. Bei vertikalen Peltonturbinen kann je nach Konstruktion das Laufrad entweder nach oben ausgebaut werden, wobei der Gehäusedeckel und das Führungslager zu entfernen sind, oder es kann, was wir für richtiger halten, mit Hilfe einer besonderen Abzieh- und Hebevorrichtung nach unten auf einem speziell für diesen Zweck vorgesehenen Wagen demontiert werden. Die Erfahrung (Anlagen Innertkirchen und Handeck) hat gezeigt, dass die Auswechslung des Laufrades sogar bei ganz grossen Einheiten nicht mehr als etwa 36 h beansprucht, so dass es mög-

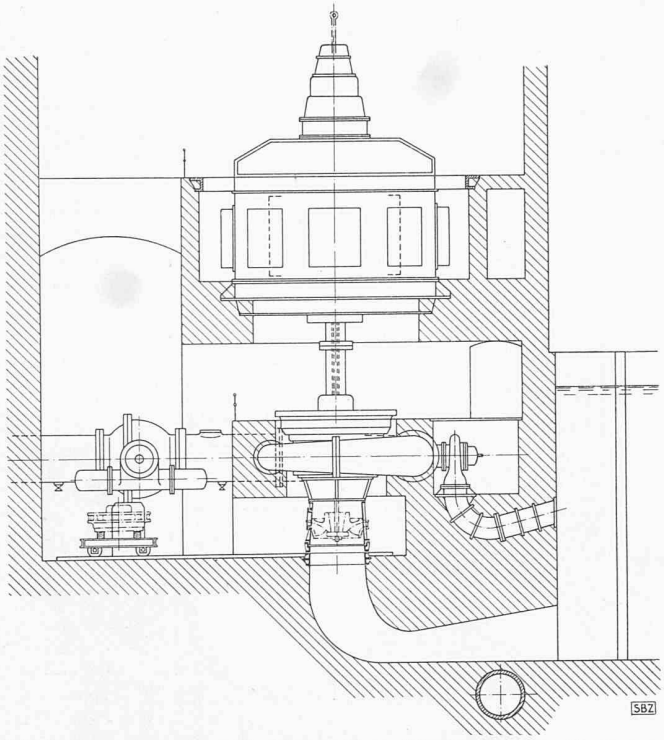


Bild 8. Demontage einer Hochdruck-Francisturbine mit vertikaler Welle nach unten

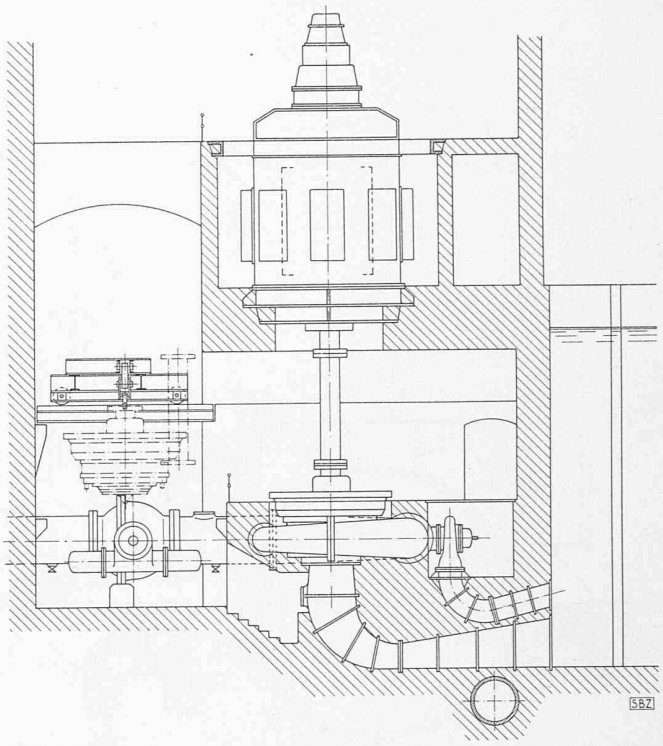


Bild 9. Demontage einer Hochdruck-Francisturbine mit vertikaler Welle nach oben

lich ist, sie während des Wochenendes, wenn eine Gruppe in der Regel stillgelegt wird, durchzuführen.

Eine solche verhältnismässig rasche und leichte Auswechslung abgenützter Teile war bei den früher für mittlere Gefälle und sauberes Betriebswasser konstruierten Francisturbinen in der Regel nicht nötig. Wohl konnten auch bei diesen Ausführungen sämtliche der Abnützung unterworfenen Teile herausgenommen und, falls nötig, durch neue ersetzt oder repariert werden, jedoch war dazu ein längeres Stilllegen der Maschinen notwendig. Seit man aber dazu übergegangen ist, Francisturbinen für hohe Gefälle zu bauen, wobei auch mit dem Vorhandensein von Verunreinigungen im Wasser und damit mit einer entsprechenden Abnützung gerechnet werden musste, ist durch entsprechende Verbesserung der Konstruktion erreicht worden, dass auch bei diesen Turbinen eine verhältnismässig rasche Demontage und ein bequemer Ersatz dieser gefährdeten Teile möglich ist.

In weniger gefährlichen Fällen, wo sich die Abnützung voraussichtlich auf die normalerweise aus weniger hartem Material angefertigten rotierenden Dichtungsringe am Laufrad beschränken wird, kann bei Turbinen mit vertikaler Welle, die meistens in Frage kommen, nach Entfernung des mehrteilig ausgeführten Saugrohroberteils und des Ablaufstutzens das Laufrad, wie bei der Peltonturbine, nach unten auf einen zu diesem Zweck besonders vorgesehenen Wagen hinuntergelassenen und in die Reparaturwerkstätte transportiert werden (Bild 8). Je nach Umständen können die abgenutzten Dichtungsringe durch neue ersetzt werden oder es wird an Stelle des entfernten Laufrades ein in Reserve gehaltenes komplettes Laufrad mit Dichtungsringen eingebaut.

Ist eine verhältnismässig rasche Abnützung zu befürchten, so wird die Konstruktion der Francisturbine so ausgebildet, dass nach Entfernen des zwischen Turbinen- und Generatorwelle befindlichen Wellenmittelstücks zuerst der gesamte innere Teil der Turbine (bestehend aus Laufrad mit Wellenstück, Führungslager und Stopfbüchse, sämtlichen Leitradschaufeln mit oberem Leitraddeckel) nach oben herausgezogen wird, worauf falls nötig auch der untere Leitradring mit den unteren Labyrinth- und Schutzringen mit Hilfe einer besonderen Hebevorrichtung ebenfalls nach oben ausgebaut und unter Benützung einer speziellen Transportvorrichtung in die Reparaturwerkstätte der Zentrale gebracht werden kann (Bild 9). Durch Einmontieren eines in Reserve gehaltenen kompletten Turbineninnenteils sowie neuer unterer Labyrinth- und Schutzringe wird die Turbine wieder in betriebsfähigen Zustand gesetzt.

Die Zeit für die Demontage der oben erwähnten Teile und für das Einmontieren der Ersatzteile beträgt bei guter Vorbereitung etwa 50 bis 60 Stunden; sie ist also grösser als bei der Peltonturbine. Dagegen sind solche Auswechslungen bei Francisturbinen seltener vorzunehmen als bei Peltonturbinen.

Voraussichtlich werden sich die Kosten eines kompletten Innenteils einer Francisturbine höher stellen als diejenigen des Laufrades, der Düseneinsätze und der Nadelspitze einer Peltonturbine gleicher Leistung, jedoch wird wegen des im Vergleich mit einer solchen Peltonturbine bedeutend kleineren und leichteren Francislaufrades der Kostenunterschied im Verhältnis zum Gesamtpreis der Turbinenausrüstung nicht ins Gewicht fallen, besonders dann nicht, wenn die Anlage aus mehreren Gruppen besteht, für die nur ein Satz Ersatzteile in Bereitschaft gehalten zu werden braucht.

3. Anlagekosten

Ein unbestrittener Vorteil der Francisturbine besteht in der bekannten Tatsache, dass diese Turbine bei sonst gleichen Betriebsverhältnissen für eine bedeutend höhere Drehzahl gebaut werden kann als eine Peltonturbine, was ein geringeres Gewicht und einen niedrigeren Preis nicht nur der Turbine selbst, sondern auch des mit ihr gekuppelten Generators zur Folge hat. Die höhere Drehzahl könnte eine kompliziertere und teurere Konstruktion des Generators nach sich ziehen, jedoch zeigt die Erfahrung, dass dies bei Generatoren europäischer Firmen in der Regel nicht der Fall ist. Wenn auch zugegeben werden muss, dass die Kosten der eigentlichen Gruppen prozentual einen nur geringen Teil der Gesamtkosten der Anlage ausmachen, so muss anderseits daran erinnert werden, dass schon ein kleines Anwachsen dieser Gesamtkosten sich verhältnismässig stark auf das finanzielle Ergebnis des Unternehmens auswirken kann. Denn die Rendite, die sich aus der Differenz zwischen Einnahmen und Ausgaben ergibt, wird durch eine verhältnismässig unbedeutende Erhöhung der Amortisationskosten stark beeinflusst.

Im Sinne geringerer Anlagekosten wirken ausserdem bei Francisturbinen folgende Momente: Die bedeutend kleineren Dimensionen der schnellaufenden Gruppen bewirken eine entsprechende Reduktion der Ausmasse des Unter- und Oberbaues der Zentrale und infolgedessen der Baukosten. Der Laufkran kann für eine kleinere Hubkraft und kürzere Spannweite gebaut werden. Die Wasserzuführung ist bei Francisturbinen viel einfacher als bei vieldüsigen Peltonturbinen.

Anderseits müssen Francisturbinen in der Regel zwecks Vermeidung von Kavitation tiefer gesetzt werden als Pelton-

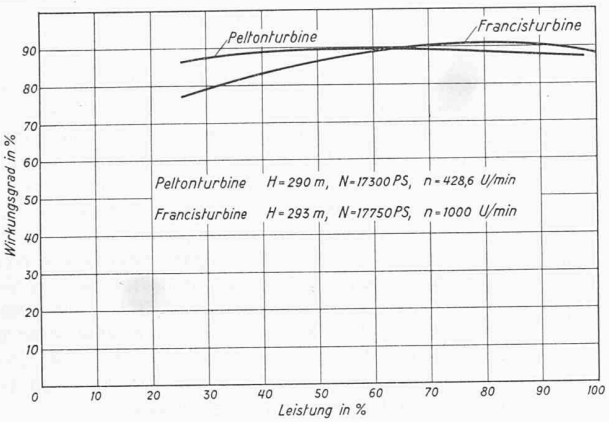


Bild 10. Vergleichende Wirkungsgrad-Garantiekurven einer Pelton- und einer Francisturbine

turbinen, was im allgemeinen bei offenen Anlagen mit erhöhten Aushub- und Baukosten verbunden ist. Bei unterirdisch angeordneten Anlagen (Kavernenzentralen) tritt eine solche Verteuerung nicht ein.

Selbstverständlich ist es nicht möglich, allgemein gültige Angaben über die durch die Wahl von Francisturbinen erzielbare Reduktion der Anlagekosten zu machen. Dies kann nur von Fall zu Fall durch Aufstellung eines genauen Projekts und einer detaillierten Kalkulation geschehen. Dabei wird aber auch untersucht werden müssen, ob sich nicht durch Wahl einer geringeren Zahl von Einheiten grösserer Leistung eine günstigere Lösung mit Francisturbinen finden lassen wird.

4. Wirtschaftlichkeit der Anlage

Von Einfluss ist hier zunächst der Verlauf des Wirkungsgrades. Im Bereich von ungefähr 65 bis 100 % Belastung verläuft die Wirkungsgradkurve der Francisturbine oberhalb, dagegen im Bereich unter 65 % unterhalb derjenigen der Peltonturbine (Bild 10). Die Unterschiede nach beiden Seiten hängen von der Grösse der Turbinen und den Betriebsbedingungen ab. In der Regel wird in einer Anlage darnach gestrebt, die Einheiten möglichst im oberen Belastungsbereich arbeiten zu lassen, so dass die Energieproduktion einer mit Francisturbinen ausgerüsteten Zentrale infolge des besseren Wirkungsgrades dieser Turbinenart bei gleicher verfügbarer Wassermenge in der Regel grösser sein wird als diejenige einer Anlage mit Peltonturbinen.

Allgemein wird diese Zunahme der Energieproduktion prozentual nicht gross sein, jedoch gilt auch hier die im vorhergehenden Kapitel bei der Betrachtung der Anschaffungskosten gemachte Ueberlegung, wonach sich trotz eines verhältnismässig kleinen Unterschiedes und der sich daraus ergebenden verhältnismässig geringen Mehreinnahmen aus der verkauften Energie eine fühlbare Zunahme der Rendite des Unternehmens ergeben kann.

In gleicher Weise wird sich auch der durch den Freihang der Peltonturbine verursachte Gefällsverlust auswirken, der, wenn auch im allgemeinen relativ klein, aus dem vorstehend erwähnten Grund dennoch einen verhältnismässig starken Einfluss auf das finanzielle Ergebnis eines Unternehmens ausüben kann. Dieser Freihang kann ganz beträchtlich werden, wenn der Wasserstand im Unterwasserkanal bedeutenden Schwankungen unterworfen ist; es tritt dann ein fühlbarer Gefällsverlust ein. Ein solcher Gefällsverlust besteht bei der Francisturbine nicht.

Einen Einfluss auf die Betriebskosten und infolgedessen auch auf die Wirtschaftlichkeit einer Anlage wird unter Umständen die Zeit ausüben, während der die Gruppen zwecks Vornahme von Reparaturen oder Auswechslung abgenützter Teile ganz stillgelegt werden müssen. Die Frage, bei welcher Turbinenart diese Zeit grösser sein wird, lässt sich, wie erwähnt, nicht eindeutig vorausbeantworten.

5. Regulierung

Hinsichtlich der Regulierung besteht zwischen beiden Turbinenarten kein wesentlicher Unterschied, vorausgesetzt, dass die Francisturbine mit einem Druckregler ausgerüstet wird (Bild 11). Dieser Regler verringert den bei plötzlichen Entlastungen entstehenden maximalen Druckstoss, wie bei der Peltonturbine, auf etwa 10 % des statischen Druckes, wodurch eine Gefährdung der Rohrleitung vermieden wird. Ebenso kann der momentane Drehzahlanstieg bei Teilentlastungen in ungefähr den gleichen Grenzen gehalten werden wie bei Peltonturbinen. Wohl besteht hinsichtlich des Drehzahlanstieges bei Vollentlastungen ein merklicher Unterschied zu Gunsten der Peltonturbine, jedoch spielt dieser Unterschied eine praktisch nur untergeordnete Rolle, indem die Gruppe dabei vollständig vom Netz abgeschaltet wird. Wenn sich auch der Preis der Francisturbine infolge des Hinzukommens des Druckreglers erhöht, so steht diese Preiserhöhung in keinem Verhältnis zu der durch die niedrigere Drehzahl bedingten Erhöhung der Anschaffungskosten der Peltonturbine.

In der nachstehenden Tabelle 1 sind die Hauptdaten einiger wichtiger Anlagen mit Hochdruck-Francisturbinen zusammengestellt, für die Escher Wyss die Turbinen geliefert oder noch in Ausführung hat. Zusammen mit anderen Einheiten kleinerer Leistung beträgt die Gesamtleistung solcher Turbinen über 1 Mio PS. Es sind dies zum Teil Maschinen, die früher zweifelsohne als Peltonturbinen ausgebildet worden wären und für welche manche Turbinenfirma noch solche Turbinen empfehlen würde.

Diese Ausführungen beweisen, dass die sowohl von Turbinenfirmen als auch von Betriebsfachleuten öfters geäusserten Bedenken gegen die Verwendung von Francisturbinen in Hochdruckanlagen unbegründet sind und dass diese Turbinenart bei Gefällen bis zu etwa 400 m — vermutlich sogar darüber — bezüglich Betriebssicherheit der Peltonturbine als ebenbürtig betrachtet werden darf. Zieht man noch die mannigfachen Vorteile, die jene Turbinenart gegenüber der Peltonturbine aufweist, in Betracht, so muss das Bestreben, der Francisturbine im erwähnten Gefällsbereich den Vorzug vor der Peltonturbine zu geben, als durchaus berechtigt anerkannt werden. Auch darf angenommen werden, dass dieses Bestreben weiter zunehmen wird und dass in den kommenden Jahren dank der im Bau grosser

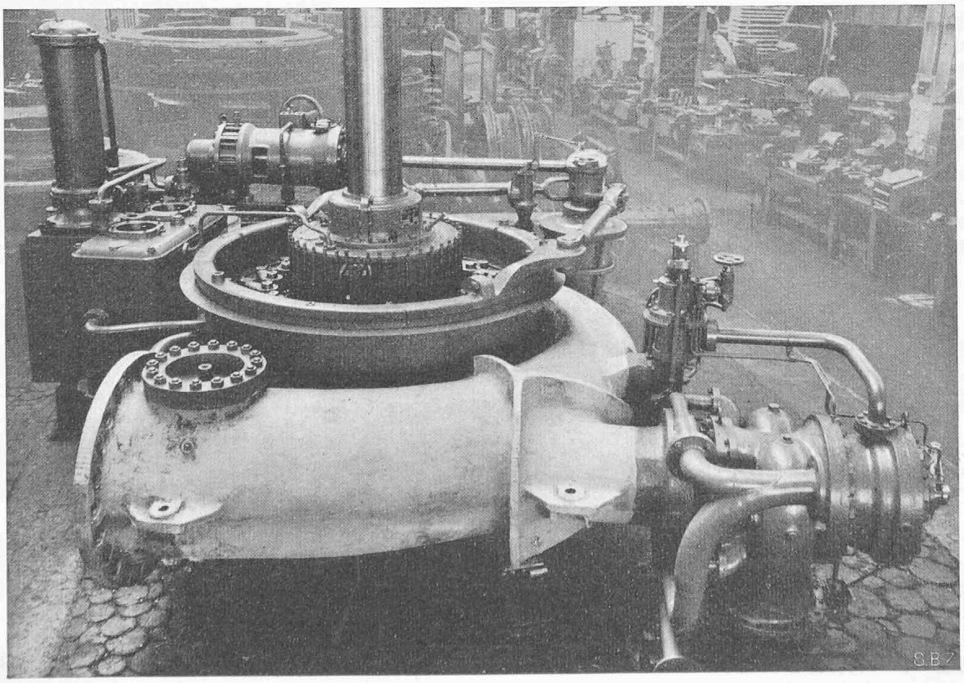


Bild 11. Wasserkraftwerk Julia. Druckregler, angebaut an eine vertikale Francisturbine von 17750 PS bei 293 m Nettogefälle

Tabelle 1. Hauptdaten moderner Hochdruck-Francisturbinen von Escher Wyss A.-G., Zürich

Anlage	Land	Gefälle in m	Einzelleistung in PS	Gesamtleistung in PS	Drehzahl U/min
Rempen	Schweiz	260	22 500	90 000	500
Rjukanfos	Norwegen	280,5	17 500	17 500	600
Sauda	Norwegen	230	30 000	90 000	500
Zappello	Italien	360	7 530	15 060	1260/1500
Rodund	Oesterreich	346	66 200	264 800	500
Bitto	Italien	374	14 620	14 620	1260/1500
Mörel	Schweiz	260	24 900	74 700	750
Caterno	Italien	281	15 000	15 000	750
Devero	Italien	200	7 070	7 070	750
Saaheim	Norwegen	255	6 750	6 750	1000
Las Conchas	Spanien	200	16 230	32 400	750
Julia	Schweiz	293	17 550	35 100	1000
Dobsina	Slowakei	277	14 600	29 200	1000
Soverzene	Italien	284	74 500	74 500	360/428,7
Verbano	Schweiz	292	40 600	162 400	600
Escarra	Spanien	316	8 000	8 000	1000
Fiastrone	Italien	333	20 140	40 280	1000

Wasserturbinen zu gewärtigenden Fortschritte, nicht zuletzt auch dank der in der Erzeugung hochwertiger Metalle und sonstiger Materialien erzielten Erfolge, mit einer weiteren Verschiebung der zwischen den Anwendungsgebieten von Francis- und Peltonturbinen liegenden Grenze in der Richtung höherer Gefälle gerechnet werden darf.

Die Gestaltung der Schienenfahrbahn

Von Dipl. Ing. G. und H. Peter, Bern DK 625.113

Hierzu Tafel 43/44

In der Schweiz. Bauzeitung 1949, Nr. 18, S. 245* wurde gezeigt, wie mathematisch einwandfreie **Uebergangskurven** erhalten werden können. Ausgehend vom Radius R des Grundkreises, der mit Rücksicht auf die topographischen Verhältnisse, auf die Neigungs- und Richtungsverhältnisse im vorliegenden Bahnbereich, sowie auf die zulässige Fahrgeschwindigkeit als festgelegt vorausgesetzt ist, wird die Abszissenlänge l_1 der kubischen Parabel derart gewählt, dass einerseits die Neigung der Ueberhöhungsrampe nicht zu steil, anderseits ein erträglicher Ruck (spezifische Aenderung der Querbeschleunigung) nicht überschritten wird. Für l_1 gilt:

$$(1) \qquad 300\,(400)\,H \leqq l_1 \geqq 0{,}555\,V_{max}$$

l_1 darf nicht kleiner, kann aber grösser gewählt werden bis $l_1 \lesseqgtr 0{,}67082\,R$. Bezeichnungen und Masseinheiten sind aus dem Beispiel am Schluss (S. 435) ersichtlich.

Als gegeben zu betrachten sind also der Radius R des Grundkreises und die ungefähre Abszissenlänge l_1 der Uebergangskurve. Mit diesen beiden Elementen kann man sich schon über zwei weitere Elemente annähernd orientieren, über die Neigung tg α_1 der Tangente am Zusammenschluss E von Uebergangskurve und Kreis, sowie über das Mass c_1, um das der Radius R des Grundkreises verkleinert werden muss

$$(2) \qquad \operatorname{tg} \alpha_1 \sim \frac{l_1}{2R} \qquad\qquad (3) \qquad c_1 \sim \frac{l_1^2}{24R}$$

Mit den Elementen R, l_1, tg α_1 und c_1 kann man die Neigung tg α_E der Endtangente derart bestimmen, dass die endgültige Abszissenlänge l mit der gewählten l_1 nahezu übereinstimmt, nämlich:

$$(4) \qquad \operatorname{tg} \alpha_E = \frac{l_1}{\sqrt{[2(R-c_1)]^2 - 3\,l_1^2 - 3\,l_1^2 \operatorname{tg}^2 \alpha_1 - l_1^2 \operatorname{tg}^4 \alpha_1}} \leqq$$
$$\leqq 0{,}44721$$

Die Bedingung tg $\alpha_E \leqq 0{,}44721$ (oder $l \lesseqgtr 0{,}67082\,R$) ist notwendig, weil die kubische Parabel bei $\alpha_E = 24^\circ\ 5'\ 41''$ ein Maximum der Krümmung aufweist.

Es kommt nicht darauf an, die Neigung tg α_E aus (4) möglichst genau zu berechnen; wenn die dritte Dezimale nach dem Komma, auf- oder abgerundet, richtig ist, erhält man aus

$$(5) \qquad l = \frac{3R\,2\cos^3\alpha_E \operatorname{tg}\alpha_E}{3\cos\alpha_E + 2\cos^3\alpha_E \operatorname{tg}^2\alpha_E}$$

eine endgültige Abszissenlänge l, die mit l_1 nahezu übereinstimmt. Die verbleibende Abweichung spielt praktisch keine Rolle, weil die Bogenlänge doch etwas grösser ist: im äussersten Falle, tg $\alpha_E = 0{,}44721$, kann die Bogenlänge zwischen $1{,}0115\,l$ und $1{,}0318\,l$ betragen. *Von ausschlaggebender Wichtigkeit ist dagegen, dass der Zusammenschluss E von Uebergangskurve und Kreis nach Koordinaten, Tangentenrichtung und Krümmung mathematisch einwandfrei ist, was nach dem klassischen Rezept nie, nach dem hier beschriebenen Verfahren aber immer erreicht wird.*

Der Radius $r = R - c$ des konzentrisch verkleinerten Kreises ergibt sich aus

$$(6) \qquad r = \frac{l}{2\cos^3\alpha_E \operatorname{tg}\alpha_E}$$

und damit

$$(7) \qquad c = R - \frac{l}{2\cos^3\alpha_E \operatorname{tg}\alpha_E}$$

Die richtige Orientierung der Uebergangskurve in bezug auf die ursprünglichen Berührungspunkte B des Grundkreises R mit den Grundtangenten erhält man aus

$$(8) \qquad l - a = r \sin\alpha_E \quad \text{bzw.} \quad a = l - r\sin\alpha_E = l - (l - a)$$

Da die Endordinate

$$(9) \qquad y_E = \frac{l}{3} \operatorname{tg}\alpha_E = R - r\cos\alpha_E$$

nun bekannt ist, ergeben sich beliebige Punkte im Abstand x vom Uebergangsbogen-Anfang A aus

$$(10) \qquad y_x = y_E \frac{x^3}{l^3} \quad \text{z. B.} \quad y_B = y_E \frac{x_B^3}{l^3}$$

Praktisch teilt man die Abszissenlänge l in n Teile, wofür

$$y_1 = y_E \frac{1^3}{n^3}, \quad y_2 = y_E \frac{2^3}{n^3}, \ldots\ y_{n-1} = y_E \frac{(n-1)^3}{n^3},$$
$$y_n = y_E$$

Ist y_E beispielsweise die Endordinate für die Abszissenlänge $l = 44{,}891$ m, so wird man zweckmässig die Ordinate für $x = 40$ m, das ist $y_{40} = y_E \left(\frac{40}{44{,}891}\right)^3$ berechnen, diese 40 m in acht Teile teilen, wofür

$$y_5 = y_{40} \frac{1}{8^3}, \quad y_{10} = y_{40} \frac{8}{512}, \quad y_{15} = y_{40} \frac{27}{512} \ldots\ y_{35} =$$
$$= y_{40} \frac{343}{512}$$

Die Benützung der allgemeinen Formel der kubischen Parabel

$$(11) \qquad y = k\,x^3 = \frac{x^3}{6\,r\,l\cos^3\alpha_E}$$

wird selten zweckmässig sein.

Wenn es sich um die Aufstellung von *Normalien* handelt, so entsteht das Bedürfnis nach Berechnungstabellen. Solche können natürlich schon für die Berechnung einzelner Kurven sehr erwünscht sein, damit sie von jedermann ohne ungewohnte Rechenarbeit benützt werden können.

Bezeichnet man mit

$$(12) \qquad Z = 2\cos^3\alpha_E \operatorname{tg}\alpha_E \quad \text{(siehe Gl. (5) und (6))}$$

$$(13) \qquad N = 3\cos\alpha_E + 2\cos^3\alpha_E \operatorname{tg}^2\alpha_E \quad \text{(siehe Gl. 5))}$$

so wird:

$$(14) \qquad \frac{l}{R} = \frac{3Z}{N}; \qquad\qquad (15) \qquad \frac{l-a}{R} = \frac{3}{N}\sin\alpha_E;$$

$$(16) \qquad \frac{a}{R} = \frac{l-(l-a)}{R} = \frac{3}{N}(Z - \sin\alpha_E)$$

$$(17) \qquad \frac{c}{R} = \frac{N-3}{N} \quad \text{und}$$

$$(18) \qquad \frac{y_E}{R} = \frac{l}{3}\operatorname{tg}\alpha_E = \frac{Z}{N}\operatorname{tg}\alpha_E$$