

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 91 (2000)

Heft: 10

Artikel: Reaktivierung Kleinwasserkraftwerk Perlen

Autor: Leutwiler, Hanspeter

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-855552>

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: 15.01.2026

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

Reaktivierung Kleinwasserkraftwerk Perlen

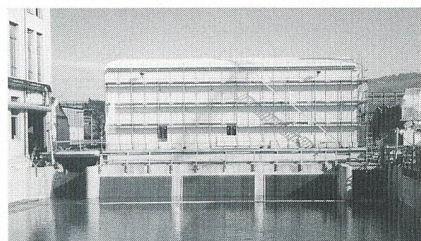
Niederste Gefälle wirtschaftlich nutzen

In der Schweiz liegt ein beachtliches Energiepotenzial in stillgelegten und überalterten Niederdruck-Wasserkraftwerken brach. Das Beispiel der Wasserturbinenanlage Papierfabrik Perlen zeigt, dass mit innovativen Ansätzen und konsequenter Planung eine Erneuerung zur industriellen Selbstversorgung wirtschaftlich sein kann. Erstmals kommt in der Schweiz eine «vollgeheberte» Anlage mit einfachregulierten Turbinen zum Einsatz.

■ Hanspeter Leutwiler

Von der Quelle lokalen Reichtums zum Sanierungsobjekt

Mit Hunderten von Kleinwasserkraftwerken legten innovative Unternehmer einst den Grundstein für das industrielle Zeitalter in der Schweiz. Die meisten nutzten nur geringe Flussgefälle und oft nur den dauernd vorhandenen Teil des Wasserdargebots. Die hydraulischen Potenziale bestimmten den Standort der Industrien, wo heute vielerorts nur noch ein Strassenname an das Kraftwerk erinnert.



Baustelle des neuen Wasserkraftwerks Perlen.

Je kleiner die Leistung und je kleiner das Nutzgefälle, um so teurer kommt die Kilowattstunde zu stehen. Deshalb verwundert es nicht, dass in den vergangenen Perioden der Euphorie von Billigstrom «à discretion» viele kleinere Ultra-Niederdruck-Kraftwerke stillgelegt wurden, sobald das Ende ihrer technischen Lebensdauer erreicht war. Seit die er-

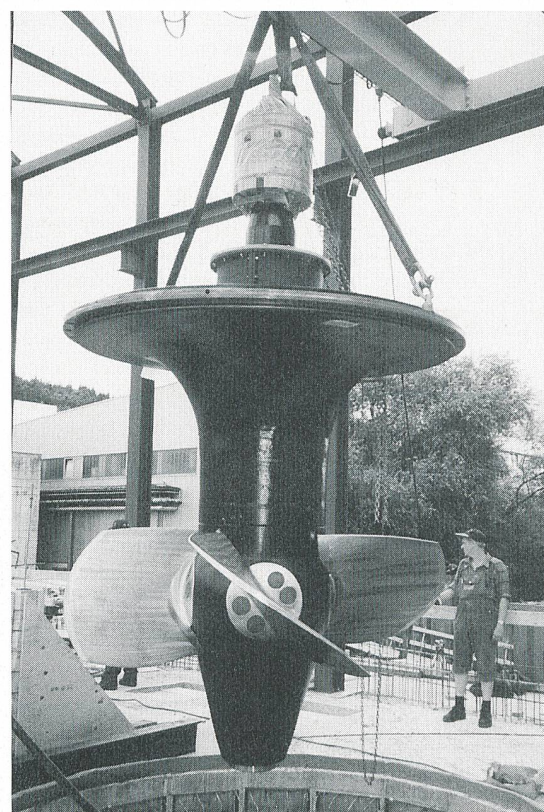
neuerbaren Energien eine neue Wertschätzung erhalten haben, wurden etliche Anlagen aus idealistischen Motiven erneuert, ungeachtet ihrer fehlenden Wirtschaftlichkeit. Andere wiederum überleben wirtschaftlich, weil sich ihre robusten technischen Einrichtungen nicht «ausfahren» lassen – sie dümpeln mit der Strategie minimalen Renovationsaufwandes weiter, unter langsam aber stetig sinkender Produktion und steigenden Personalkosten. Tritt ein teurer Reparaturfall ein, bestimmen letztlich die Rentabilität eines Erneuerungsprojektes und die politisch-wirtschaftlichen Rahmenbedingungen über ein definitives «Aus» oder einen weiteren Generationen langen Betrieb.

Die beiden Kraftwerke der Papierfabrik Perlen an der Reuss im Kanton Luzern entsprechen diesem Typ. Sie liegen an einer 3,2 Kilometer langen fabrikeigenen Ausleitung. Die beiden in Serie als Durchlaufanlagen im Kanal angeordneten Zentralen nutzen je 2,7 m Gefälle und leisten je rund ein Megawatt. Die Anlage wurde Mitte des 19. Jahrhunderts von Theodor Bell gebaut und galt als Pionierleistung. Die weitsichtigen Erbauer der Erstanlage sahen Ausbauten in Etappen vor, welche bald folgten. Die Elektrifizierung der hier beschriebenen «Wasserturbinenanlage Papierfabrik» (WTA-PF) erfolgte zu Beginn des vergangenen Jahrhunderts mit vier neuen «Generatorturbinen» der Firma Voith. Parallel dazu wurden drei neue, weiterhin rein mechanisch genutzte, treibende Turbinen eingebaut. Diese trieben über eine Königswelle und Riementreibe Mahlmaschinen zur Stoffaufbereitung an, so genannte Holländer. In den Vierzigerjahren wurde die Holländerturbinenwelle an einen Generator gekuppelt, und seither hat die WTA-PF ohne nennenswerte Investitionen ihren Dienst getan.

Nach Dienst über Generationen erneuern?

Die oberliegende «Wasserturbinenanlage Holzfabrik» wurde bereits 1981 komplett neu erstellt und mit einer einzigen, 49 m³/s schluckende S-Rohrturbine ausgerüstet. Das doppeltregulierte, dreiflügelige Kaplanlaufrad mit 3,2 Meter Durchmesser dreht lediglich mit 103 Umdrehungen pro Minute und treibt über ein zweistufiges Stirnradgetriebe einen Synchrongenerator (Drehzahl 1000 U/min) an. Der moderne Kompaktbau weist keinen Hallenkran auf – die Maschinen müssen im Unterhaltsfall über Dachluken ausgehoben werden.

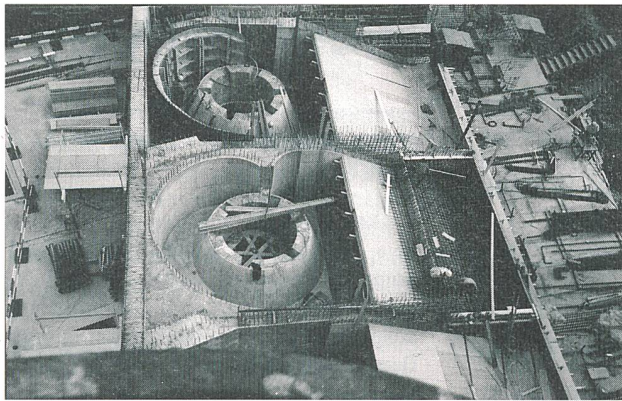
Im Laufe der Achtzigerjahre gab in der WTA-PF eine Turbine nach der andern «den Geist auf». Zu schaffen machten vor allem die aufwändig zu reparierenden Holzverzahnungen mit Kammrädern und mechanische Schäden. Ein Menschenalter lang hatten die extrem schwer und langsamläufig gebauten Schaufeln, Zahnräder, Wellen und Generatorwicklungen zuverlässig Energie umgewandelt und übertragen. Anfangs der Neunzigerjahre wurde der Betrieb der Zentrale schliesslich aufgegeben. Eine Reparatur



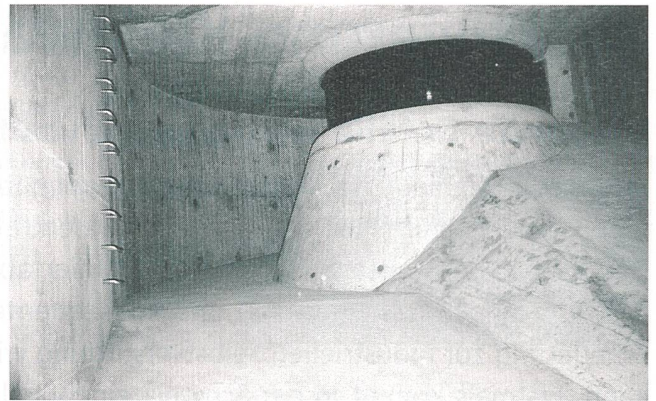
Das Laufrad ist identisch mit dem einer klassischen Kaplan turbine.

Adresse des Autors

Hanspeter Leutwiler, dipl. Ing. ETH
ITECO Ingenieurunternehmung AG
Postfach
8910 Affoltern am Albis



Aufwändige Schalungen sind notwendig, um eine optimale Einlaufspirale zu bilden.



Die Einlaufspirale verteilt die Druck- und Geschwindigkeitsenergie gleichmässig auf die fixe Stützschaufel.

kam wegen den schlechten Wirkungsgraden und dem personalintensiven Betrieb nicht in Frage.

Überraschendes Optimum

Eine Variantenstudie zeigt die Handlungsspielräume auf und kreiste optimale Lösungen ein. Alle Möglichkeiten von Abbruch, Gefällserhöhung der Oberliegeranlage, Maschinenersatz und Neubau wurden untersucht. Messlatte waren dabei die Grossverbraucher-Bezugspreise für Mittelspannungsenergie der Papierfabrik, da alle Energie im fabrikeninternen Netz eigenverbraucht wird.

Die Resultate waren erstaunlich: ein Einmaschinenkonzept, wie es aufgrund der Gesetze der «Economy of Scale» zu erwarten wäre, war nicht wirtschaftlich. Die Maschinenkosten resultierten höher, weil gröszenbedingt der Turbinentyp wechselte, und die Baumeisterarbeiten wegen der Tiefe und Länge des Baus teurer wurden. Seit der Erneuerung der oberliegenden WTA-HF hatte sich offenbar auf dem Kleinturbinenmarkt etliches getan. Auch eine Zweimaschinenlösung war wider Erwarten der Dreimaschinenlösung wirtschaftlich unterlegen, da mit drei Maschinen einfachere Bauarten möglich wurden. Der baulich einfachste Ansatz, drehzahlvariable kompakte

Tauchturbinen ohne mechanische Regulierung in die sieben bestehenden Turbinenaussparungen und Saugrohre einzusetzen, ergab höhere Kosten als «klassische» Lösungen, und darüber hinausgehend markante Produktionseinbussen.

Die Papierfabrik entschied sich in der Folge für die Gesamterneuerung der Anlage mit drei vertikalen Kaplan turbinen in einem grosszügigen Raumkonzept mit Hallenkran.

Das Bauprojekt und noch deutlicher die Ausschreibung der Bauarbeiten brachten zutage, dass ein Erhalt des alten Backsteingebäudes wegen den Baurisiken gegenüber der Variante eines neuen Maschinenhauses keine gute Lösung wäre.

Auf Nebenschauplätzen 5 Prozent Energie gewinnen

Die Ertragsstudie zeigte Mängel bei der Fassung auf: Die konzedierte mittlere Wassermenge von 45 m³/s konnte erst bei einem beträchtlichen Überstau und Wasserverlust über das Wehr erreicht werden. Die Ausräumung des Kanals und die Sanierung zerfallender Abschnitte der Uferbefestigung genügten nicht. Die Einlaufströmung erwies sich als ungünstig. Deshalb wurde ein Ausbaukonzept erarbeitet, welches die Fassung der Konzessionswassermenge unter Einhalten des konzidierten Stauzieles ermöglicht, ohne Veränderungen am Reusswehr oder an der Konzession.

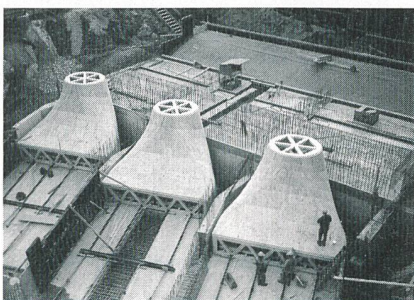
Die Sanierung umfasste gerundete, breitere Einläufe mit automatischen Schützen, die nicht mehr dauernd für den Überflutschutz des Kanals eingetaucht bleiben müssen, sondern von der Portierloge aus überwacht und nur bei Bedarf heruntergefahren werden. Auch die Wehrschützen rüstete man für eine Automatisierung auf und bezog sie in die Regelung ein. Der Kanal ist nun besser ge-

gen Überflutung geschützt. Es wurden weitere Schwachpunkte der alten Fassung saniert: die Gefährdung des Betriebspersonals beim Bedienen der Einlaufschützen vor Ort, das Einklemmen von Treibgut in den zu engen Schützenfeldern und die unschöne Ansammlung von Geschwemmel vor den Schützen. Das Treibgut schwimmt jetzt unter den Schützen hindurch in den Kanal und wird bei den automatischen Rechenanlagen entsorgt. Der Betriebswassergewinn kommt beiden Anlagen zugute und erhöht die Gesamtproduktion um über 5%.

Verfeinerungen mit Trends und Innovationen aus dem Markt

Die Turbinenausschreibung zeigte eindeutig in die Richtung einfach regulierter Kaplan turbinen, angesichts der Konstanz der Wasserentnahme und der Aufteilung auf drei Turbinen faktisch ohne Produktionseinbüsse gegenüber doppelt regulierten Maschinen. Verzichtet man auf die Regelung der Leitapparate, so wird ein Saughebeereinbau interessant. An Stelle von Abschlussorganen wird bei diesem Konzept die Einlaufkannte des Stützschaufelringes der Turbine über dem Oberwasserspiegel angeordnet, mit genügend Sicherheitsabstand gegen ein unerwünschtes Einströmen bei Überwasserstand.

Aus der fixen Stützschaufelreihe und der nachfolgend angeordneten regulierenden Leitschaufelreihe der Turbine von Professor Kaplan wird eine einzige Reihe von Stützschaufeln (oder Leitschaufeln) mit fixen Anstellwinkeln. Stehen genügend zuverlässige Modellunterlagen und Erfahrungen zur Verfügung und verändert sich das Nutzgefälle in Zukunft nicht, so können diese Schaufeln angeschweisst werden, was den Kräftefluss bedeutend vereinfacht. Hy-



Hochleistungs-Saugrohre (im Bild die Betonschalungen) nutzen die Geschwindigkeitsenergie am Laufradaustritt mit hohem Wirkungsgrad.

draulisch verändern sich die Turbinen infolge der Heberanordnung nicht. Für Turbinenrevisionen müssen keine Entwässerungen vorgenommen werden. Auf oberwasserseitige Revisionsabschlüsse kann verzichtet werden, was in Perlen das Wegfallen von drei grossen Schützen und bauliche Vereinfachungen brachte. Als Abschlussorgan genügt ein einziges Set Dammbalken, zum Beispiel um unvorhersehbare Arbeiten am Beton von Einlauf oder Saugrohr durchzuführen. Zusammengefasst konnten die Anlagenkosten der Zentrale WTA-PF mit den einfach regulierten vollgeheberten Turbinen um rund einen Fünftel gesenkt werden.

Entlüften zum Anfahren

Um die Turbinen anzufahren, muss nur ein Teil der Luft aus dem luftdichten «Dom» der Einlaufspirale abgesaugt werden, damit der Wasserspiegel in der Einlaufspirale bis etwa fünf Zentimeter über die Einlaufkante des Stützschaufelringes angehoben wird. In etwas über zehn Minuten evakuieren Wasserring-Vakuumpumpen die notwendige Luftmenge. Ist der Wasserspiegel genügend angehoben, rinnt erstes Wasser auf die Laufräder und die Turbinen beginnen zu drehen. Das Wasser reisst Luft mit ins Saugrohr. Der Wasserspiegel in der Spirale steigt nun beschleunigt, die Turbinen springen regelrecht an, und nach wenigen Sekunden ist die Luft vollends aus der Spirale ausgespült. Inzwischen hat die Automatik den Generator bei Nenndrehzahl bereits auf das Stromnetz geschaltet. Die Turbine wird nun wie jede andere auf Last gefahren und schliesslich der Regelung unterstellt.

Die Turbinen werden mit Schliessen der Laufräder stillgesetzt. Dank der luftdichten Spirale kann die Evakuierung stundenlang erhalten bleiben, und ein schnelles Anlaufen ist jederzeit möglich. Ist ein Anlaufen evakuierter Turbinen absehbar, so können diese vorsorglich mit geschlossenem Laufrad evakuiert und bereitgestellt werden, was fast die gleiche Verfügbarkeit wie beim konventionellen Einbau ergibt. Da alle Armaturen in die programmierbare Vollautomatisierung eingebunden sind, können verschiedenste Fälle optimal abgedeckt werden.

Luftklappe öffnen für Schnellstopp

Ein grosser Vorteil des Vollhebereinbaus zeigt sich bei einer Schnellabschaltung. «Luftklappe auf» – Sekunden spä-

ter ist die Wasserlast von der Turbine abgefallen. Der Wasserspiegel in der Spirale pendelt gegen den Oberwasserstand, und die Maschinengruppen laufen in Luft aus. Eine Stillstandsbremse sichert die Maschinengruppen gegen unvorhergesehenes Anlaufen. Ein Wiederanlaufen benötigt wiederum die Evakuierungszeit. In Fällen mit häufigen Lastabwürfen müsste deshalb ein differenziertes Abschaltkonzept ohne sofortiges Belüften angewandt werden. In Perlen gibt es jedoch nur wenige extern bedingte Abwürfe pro Jahr – das zuverlässige technische Material reduziert störungsbedingte interne Abschaltungen auf ein Minimum. Die Luftansaugleitung wird nach aussen geführt.

Bausteine zu einem effizienten Gesamtkonzept

So einfach das mechanische Maschinenkonzept ist – bei der Energieproduktion wurden keine wesentlichen Abstriche in Kauf genommen. Im Gegenteil: ambitionöse Garantien forderten den Hersteller heraus, Spitzenhydrauliken für die Einlaufspirale, das Laufrad und das Saugrohr einzusetzen. Die Grundsätze der hydraulischen Formgebung sind die gleichen wie bei einem konventionellen Einbau.

Gegenüber der alten Anlage wurden die Turbineneinläufe mitten in den Kanal gebaut, mit je links und rechts davon eine Entlastungsklappe. Auch die Ausläufe wurden direkt in die Strömungsrichtung gedreht. Die bei Ultra-Niederdruck-Kraftwerken sehr wichtige symmetrische Anströmung und ungestörte Abströmung ist damit optimal – und dennoch sind kleine Unterschiede im Betrieb der drei Turbinen bemerkbar.

Generator: der Langsame punktet wieder

Ein weiterer Schauplatz der Optimierung waren die Synchrongeneratoren. Grosse Schirmgeneratoren produzierten vor einem Jahrhundert den ersten Strom aus Niederdruck-Kraftwerken. In den letzten Jahrzehnten kamen bei Kleinwasserkraftwerken vermehrt kostengünstige schnellläufige Standardgeneratoren mit hohen Wirkungsgraden und kleinen Abmassen auf. Die Langsamläufer verschwanden in der Mottenkiste. Für die Drehzahlerhöhung wurden Getriebe eingesetzt.

Innovative Generatorhersteller haben in den letzten Jahren das Rad der Zeit



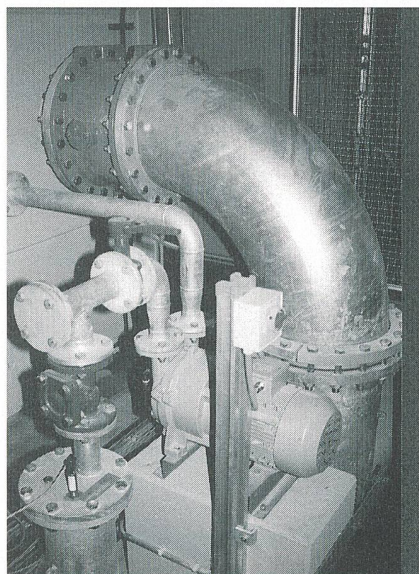
Die Generatoren erreichen bessere Wirkungsgrade als Schnellläufer und Getriebe zusammen.

zurückgedreht. Beim Bestellentscheid hatten sich die langsam laufenden Generatoren bereits so weit entwickelt, dass sie gegenüber Getriebe und Schnellläufer-Generatoren in Preis und Wirkungsgrad konkurrenzfähig wurden, sogar ohne Einbezug der schwerlich monetarisierbaren Vorteile geringeren Schadenrisikos.

Je 15 Tonnen bringen die 3 elektrischen «Elefanten» in Perlen auf die Waage. Doch das Gewicht täuscht: Entgegen der landläufigen Meinung ergibt die grosse Generatormassenschwungenergie für die Turbinen – das auf Turbinenwelle bezogene Massenträgheitsmoment ist sogar etwas kleiner als im Falle mit Getriebe.

Sichere und kostengünstige Stahlwasserbauten

Bei Turbinenschliessen und Überwasserstand muss das Kanalwasser um das Kraftwerk herum geleitet werden. Da im Überflutungsfalle ein beträchtliches Schadenpotenzial besteht, wurde die Entlastung nach der Sicherheitsregel «n+1» von grösseren Kraftwerken ausgelegt, mit zwei Bypassklappen und einer fixen Notüberfallkante. Wenn eine der zwei Klappen das Öffnen verweigern sollte, kann das maximal mögliche Kanalwasser durch eine Klappe und den fixen Überfall abgeführt werden. Die Klappensteuerung wurde in die programmierbare Kraftwerksregelung eingebunden.



Eine kleine Standard-Vakuumpumpe sorgt mit Luftabsaugung für den Turbinenanlauf.

Die Rechenreinigung – welche bis zur Stilllegung noch manuell erfolgte – übernimmt eine fahrbare Rechenreinigungsmaschine. Die Harke ist als ölhdraulischer Greifer ausgebaut, und für sperriges Schwemmgut dient ein separater Baggergreifer. Die Entsorgung erfolgt nach der Zwischenlagerung in einem Deponiefeld.

Kosten bei den Baumeisterarbeiten tief halten

Gut konzipiert ist noch nicht wirtschaftlich gebaut. Ein straffes Bauprogramm, unzählige Kleinoptimierungen und eine konsequente Bauleitung ermöglichen eine kurze Bauzeit von nur 15 Monaten. Erschwerend war dabei die Auflage, den Kanal möglichst weiter zu betreiben, damit der Energieproduktionsausfall der oberliegenden WTA-HF tragbar blieb. Unterbrochen wurden die Bauarbeiten nur wegen einer Woche sehr intensiven Schneefalls und wegen dem Extremhochwasser im Mai 1999, als die

Kennwerte der Anlage Perlen.

Bruttopfalle (= ungefähr Nettopfalle):	2,7 m (2 bis 3,4 m)
Nenn-Wassermenge	3 * 15 m ³ /s
Schluckfähigkeit der Anlage	48 m ³ /s
Elektrische Maximalleistung	3 * 342 kW _{el} = 1026 kW _{el}
Synchrongeneratoren	3 * 440 kVA / 500 V/125 min ⁻¹
Gruppenwirkungsgrad bei Nennlast	86% (cos φ = 1,0)
Laufregulierte Kaplanmaschinen	2100 mm, 4-flügelig, CuAl-Bronze
Wellen und Lager	vertikalachsig, direktgekuppelt
Heberbauweise	50 cm über Oberwasserspiegel
Mittlere Produktionserwartung	7 800 000 kWh/a

Baugrube gemäss Notfallkonzept geflutet wurde.

Der Kanalbetrieb und der durchlässige Baugrund erforderten zwei Bauetappen und eine gesicherte Baugrube mit Wasserhaltung. Im Schutz der Grube konnte konventionell gearbeitet werden. Für die ein- und zweidimensional gekrümmten Schalungen der Einlaufspiralen und Saugrohre erwiesen sich Holzverschalungen gegenüber anderen Konzepten als wirtschaftlicher.

Entflechtung der Nutzungen

Die vielen am alten Maschinenhaus angebrachten Werkleitungen, deren Bruchrisiko den Ausschlag für die Neubauvariante gegeben hatte, wurden auf der Unterwasserseite des Kraftwerks auf einen verstärkten bestehenden Rohrleitungssteg verlegt. Der Fussgängerübergang vor dem ehemaligen Maschinenhaus wurde neu eingerichtet, ist jedoch von den Kraftwerksanlagen abgetrennt. Das Maschinenhaus ist heute von allen anderen Nutzungen entflochten.

Minimale Umweltauswirkungen

Das Baukonzept reduzierte Arbeiten im Wasser auf ein Minimum. Für die jeweils bis einige Wochen dauernden un-

umgänglichen Betriebsunterbrüche des Ausleitkanals wurde jeweils ein Ausfischen organisiert, langsam abgesenkt und eine Restwasserdotierung eingebaut. Die Maschinen werden mit biologisch abbaubaren Schmiermitteln und Hydrauliköl der Wassergefährdungsklasse Null betrieben. Das Turbinen-Radiallager wird wassergeschmiert. Die lange Lebensdauer der Anlage und die geringen Unterhaltsaufwendungen runden das Bild einer guten Umweltbilanz ab.

Resultate und Fazit

Die Inbetriebsetzung erfüllte alle Erwartungen. Die Garantien für Wirkungsgrade, Leistungen und Schallemissionen wurden auf Anhieb erreicht, und die Funktion lässt bis heute nichts zu wünschen übrig. Das moderne Maschinenhaus fügt sich bereichernd in den Kontext der Industriebauten der Papierfabrik ein, und innen besticht der Maschinenraum durch seine Grosszügigkeit und die übersichtliche Anordnung aller Elemente und Leitungen.

Das zuverlässige, wirkungsgradoptimale und kostengünstige Konzept bringt nicht nur eine optimale Nutzung des Potenzials erneuerbarer Energie, sondern auch einen wirtschaftlichen Betrieb. Es zeigt, dass Ultra-Niederdruck-Kraftwerke heute wieder mit den Konkurrenzbedingungen der Beschaffung von elektrischer Energie aus dem Netz erstellt werden können. Voraussetzungen sind kostengünstige innovative Konzepte, straffe Planung und angemessene Amortisationszeiten.

Das innovative Konzept wurde vom Bundesamt für Energie als Demonstrationsanlage unterstützt. Die 7,8 Millionen Kilowattstunden Jahresproduktion mit gutem Winteranteil stellen einen willkommenen Beitrag an die Zielerreichung von «Energie 2000» dar. Die exklusive der Sanierung des Kanals aufgelaufenen Anlagenkosten für die WTA-PF von 8 Millionen Franken ermutigen zum Erneuern ähnlicher Anlagen.

Réactivation de la micro-installation hydraulique de Perlen

Tirer un profit économique de faibles chutes

Il existe en Suisse un important potentiel d'énergie non utilisé par des micro-installations hydrauliques à basse pression désaffectées et vieilles. L'exemple de la modernisation de l'installation de turbines hydrauliques de la fabrique de papier de Perlen nous montre que l'autoproduction d'une petite industrie à ses propres fins peut devenir économique à l'aide de solutions innovantes et d'une planification conséquente.