

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: 90 (1999)

Heft: 2

Artikel: Wasserkraftanlagen erfolgreich modernisieren : eine profitable, erneuerbare Energieform

Autor: Cuénod, Roland / Martelli, Sandro

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-901901>

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: 18.04.2026

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

Wasserkraftanlagen erfolgreich modernisieren: eine profitable, erneuerbare Energieform

Die Aufrüstung bestehender Turbinen mit neu entwickelten Lauf- rädern kann eine erhebliche, zusätzliche Energieerzeugung ermöglichen. In diesem Zusammenhang ist heute die numerische Strömungssimulation ein Schlüsselinstrument unter den Lauf- rad-Entwicklungstechniken. Das Verbesserungspotential für bestehen- de Kraftwerke ist gross. Um diese neue Form alternativer Energie zu nutzen, sollte jedes einzelne von ihnen hinsichtlich entspre- chender Modernisierungsmöglichkeiten untersucht werden.

Einfluss auf die Angebote und somit auf die definitive Lösung hat. Mit anderen Worten, die Lieferanten werden erst in einem fortgeschrittenen Stadium einbezogen und haben dann wenig Spielraum, um alternative Szenarien auszuarbeiten, mit welchen sich die Modernisierungsvorteile noch stärker maximieren liessen.

Systematisches Vorgehen zur Turbinenmodernisierung

Sulzer Hydro hat angesichts der erwähnten Aspekte der Turbinenmodernisierung in den frühen 90er Jahren ihr dreistufiges Vorgehen [1] eingeführt, das

es ermöglicht, zusammen mit dem Anlagenbetreiber verschiedene geeignete Modernisierungsszenarien auszuarbeiten und zu evaluieren (Bild 1).

Der nachweisliche Vorteil dieses Ansatzes besteht darin, dass jede ins Auge gefasste Lösung bereits in der Planungsphase vollständig entworfen und eingehend analysiert wird, was mittels modernster Techniken erfolgt (numerische Strömungssimulation, Modellversuche, Restlebensdaueranalyse, dynamische Simulation usw.). Auf diese Weise kann der Anlagenbesitzer die optimale Modernisierung mit vollständiger Kenntnis des Aufwands und Er-

■ Roland Cuénod, Sandro Martelli

Herausforderung der Modernisierung

Die Modernisierung von Wasserturbinen umfasst ein sehr weites Feld von Aktivitäten, die sich von der Revision einzelner Bauteile bis hin zum kompletten Austausch durch moderne Maschinen erstreckt.

Die Ermittlung des optimalen Modernisierungsgrades ist eine komplexe, interdisziplinäre Aufgabe, die für jedes Kraftwerk einzeln und in einer frühen Projektphase durchzuführen ist. Der optimale Aufrüstungsgrad hängt nicht nur vom Zustand der bestehenden Anlagen ab, sondern auch von Produktionsvorgaben, einzuhaltenden Vorschriften wie auch geltenden technischen, wirtschaftlichen und ökologischen Zielen.

Die Herausforderung der Modernisierung besteht im Festlegen des Umfangs, in dem bestehende Komponenten ersetzt oder modifiziert werden sollen, um vor allem eine grösstmögliche Steigerung der Energieerzeugung zu erzielen. Gleichzeitig dürfen die Integration von neu und alt sowie die daraus folgenden Verände-

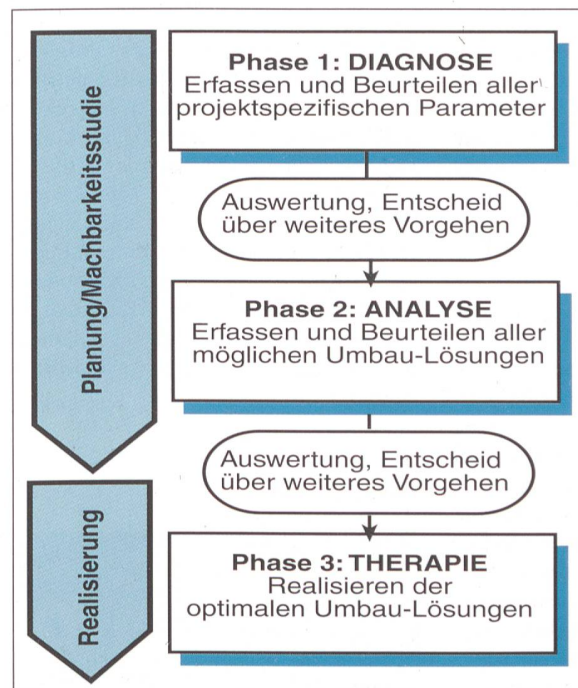


Bild 1 Dreiphasenvorgehen zur Turbinenmodernisierung.

rungen der Betriebsbedingungen die Integrität der Ausrüstung nicht beeinträchtigen, sondern sollen im Gegenteil eine höhere Sicherheit und eine längere Restlebensdauer gewährleisten.

Früher durchgeführte Sanierungen und Modernisierungen haben gezeigt, dass das herkömmliche Beschaffungsverfahren (das für Investitionen in neue Kraftwerke normalerweise angewendet wird) mit einer Spezifikation zur öffentlichen Ausschreibung weniger optimal sein dürfte. Grund hierfür ist, dass die Formulierung der Spezifikation einen starken

trags des Projektes (detaillierter Arbeitsumfang und entsprechende Investition, Implementierungsverfahren und resultierende Produktionsverluste, erzielte Verbesserungen usw.) wählen. Dadurch wird die Ermittlung des besten Szenarios sichergestellt, während sich die Gefahr unvorhersehbarer Faktoren oder einer Überschätzung der Leistungsverbesserung auf das Minimum beschränkt.

Wie aus Bild 1 hervorgeht, umfasst das Dreiphasenvorgehen verschiedene Statusberichte, mittels derer alle Aspekte (technischer, wirtschaftlicher, umweltbe-

Adresse der Autoren

Roland Cuénod, Sandro Martelli
Sulzer Hydro, Postfach, 8023 Zürich

Die Autoren möchten sich bei ihren Kollegen von Sulzer Hydro, A. Sebestyen, R. Grunder und H. Keck, die zur vorgelegten Arbeit wesentlich beigetragen haben, herzlich bedanken.

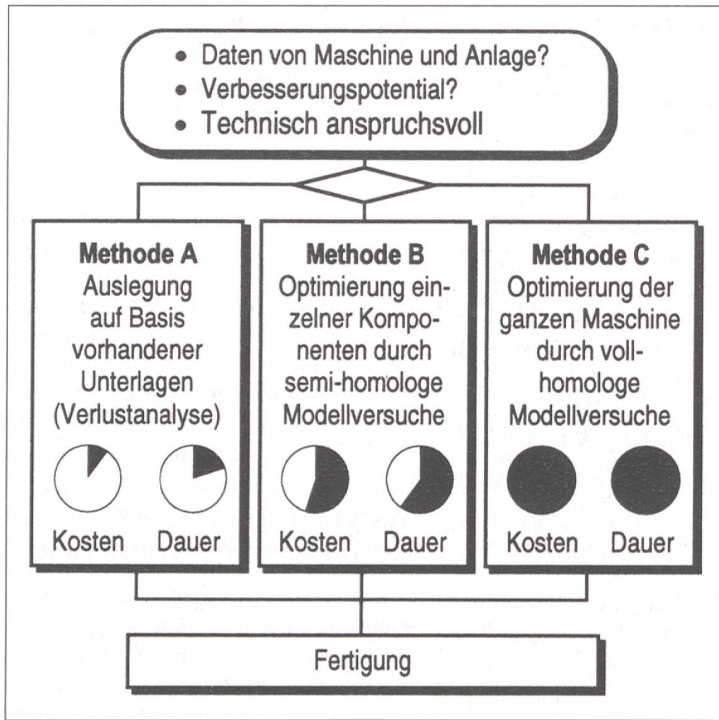


Bild 2 Verfahren zur hydraulischen Entwicklung von Ersatzlaufrädern.

zogener Art usw.) der in Erwägung gezogenen Lösungen dargelegt und mit dem Anlagenbesitzer besprochen werden, so dass dieser die Möglichkeit erhält, den Nutzen seiner Investition zu überwachen und zu beeinflussen.

Kostenwirksamkeit des Turbinenlaufrad-Ersatzes

Die Installation eines neu entwickelten Turbinenlaufrades erlaubt oft eine Steigerung der jährlichen Energieerzeugung um mindestens 5%. In manchen Fällen macht die Kapazitätssteigerung auch über 50% aus. Mit anderen Worten, die Installation moderner Laufräder in bestehenden Turbinen eröffnet in der Tat eine zusätzliche Energiequelle, die umweltverträglich und ausserordentlich wirtschaftlich ist. Investitionen in diese «gesteigerte Wasserkraft» amortisieren sich innerhalb weniger Jahre, in manchen Fällen gar innerhalb weniger Monate – zu vergleichen mit der Amortisationsdauer von 20 bis 30 Jahren für Investitionen in neue Kraftwerke.

Die Kostenwirksamkeit des Laufradersatzes hängt vor allem vom Energiesteigerungspotential sowie den Kosten der Laufradentwicklung und -herstellung ab. Den Turbinenlieferanten stehen heute verschiedene Entwicklungstechniken zur Verfügung. Dazu zählen die numerische Strömungssimulation [2, 3, 4] sowie homologe oder semi-homologe Modellversuche. In manchen Fällen können die hohen Kosten der Entwicklungsar-

beit die Machbarkeit eines Projektes beeinflussen. Sulzer Hydro hat deshalb drei verschiedene Verfahren entwickelt, durch welche die Entwicklungskosten in allen Fällen tragbar werden (Bild 2) [5]. Das Verfahren A ist sehr kostenwirksam, da es die teuren und zeitaufwendigen Modellversuche eliminiert. Dies bedeutet, dass sich auch Kraftwerke mit geringer oder mittlerer Kapazität zu angemessenen Kosten mit modernen, neu entwickelten Laufrädern aufrüsten lassen.

Fallbeispiele

Sirikit	
Turbinentyp:	Vertikale Francisturbine
Anzahl Einheiten:	3
Lieferjahr:	1972
Land:	Thailand
Nennfallhöhe:	68 m
Nennleistung:	115 MW
Synchrondrehzahl:	125 U/min
Laufraddurchmesser:	5,04 m

Der Auslöser für die Aufrüstung der Einheit 3 von Sirikit war die Tatsache, dass die hydraulische Leistung weit unter den ursprünglichen Erwartungen lag, wobei noch weitere unerwünschte Aspekte, wie Kavitation, starke Vibrationen und Druckschwankungen hinzu kamen.

1993 unterbreitete Sulzer Hydro, gestützt auf die hohen, für die Leistungs-

garantien spezifizierten Werte des Kunden, ein Angebot, das eine numerische Strömungssimulation als Alternative zum verlangten Modellversuch beinhaltete, und erhielt den Auftrag zur Aufrüstung der Einheit 3 von Sirikit.

Sulzer Hydro führte eine detaillierte CFD-Studie (Computational Fluid Dynamics) über das Laufrad und die bestehenden Stützschaufeln durch und zeigte ein bemerkenswertes Verbesserungspotential auf, indem lediglich das bestehende Laufrad ersetzt und das Profil der Stützschaufeln modifiziert würde, bei denen es sich ursprünglich um gerade Platten handelte.

Sulzer Hydro entwickelte ein neues Laufrad (Bild 3) für diese hohe spezifische Drehzahl auf Basis der dreidimensionalen Eulerschen Strömungsberechnung ohne Änderung der kurzen Kranzlänge. Ausserdem wurden die Schaufelwinkel der neuen Laufschaufeln verbessert, wodurch das Ersatzlaufrad unter allen Betriebsbedingungen kavitationsfrei arbeitet. Das Laufrad wurde dann ausschliesslich auf der Basis der CFD hergestellt. Da praktisch keine Informationen über die bestehenden Stützschaufeln verfügbar waren, führte Sulzer Hydro eine Vermessung der bestehenden Geometrie des Stützschaufelrings im Kraftwerk durch, um die Verluste bei dieser Komponente analysieren zu können.

Die Strömungsberechnung beim bestehenden Stützschaufelring erfolgte, bei Nennfallhöhe, von Teil- bis Vollast. Sie wurde mit den Navier-Stokes-Gleichungen ausgeführt, wobei die Reibungseffekte wie auch die Turbulenz berücksichtigt wurde. Substantielle hydraulische Verluste am Stützschaufelgitter wurden nachgewiesen (Bild 4). Diese einfachen, dünnen, geraden Platten bewirkten eine Ablösung der Strömung und aufgrund des hohen Anstellwinkels an der Vorderkante der Stützschaufeln auch eine beachtliche Rückströmung.

Angesichts der suboptimalen hydraulischen Form des Spiralgehäuses musste die CFD-Studie bei drei verschiedenen Querschnitten durchgeführt werden, um genauere Informationen über die Strömung zu erhalten. Dies führte zu drei verschiedenen Gruppen von Stützschaufelprofilen, je nach Winkel des jeweiligen Querschnitts. Die neuen Profile wurden implementiert, indem Verkleidungsbleche an die Vorderkante geschweisst wurden und die Dicke der Hinterkante so reduziert wurde, dass der Profilwinkel korrigiert und die Verluste reduziert wurden. Dies geht aus Bild 5 hervor. Dadurch liess sich eine Strömungsablösung

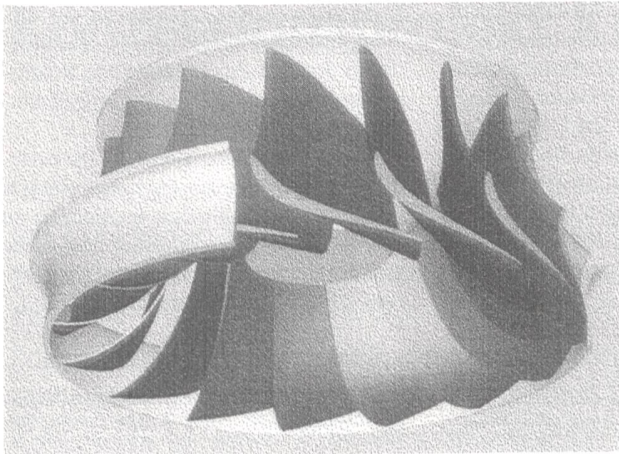


Bild 3 Computergrafik zum Ersatzlaufrad während des Entwicklungsprozesses.

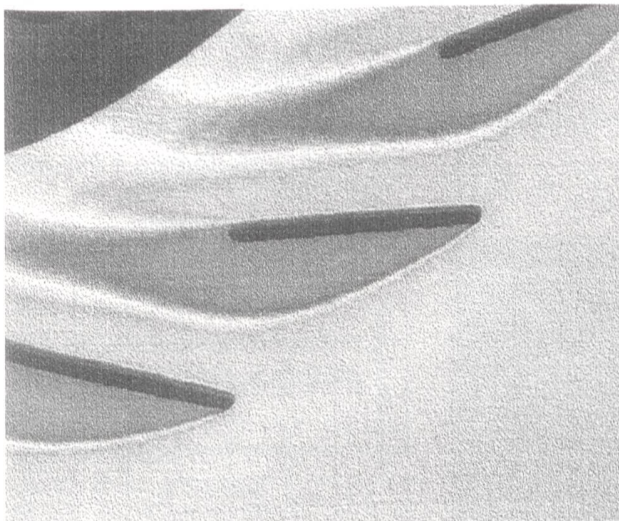


Bild 4 Berechnete Verteilung der hydraulischen Verluste innerhalb des bestehenden Stützschaufelrings.

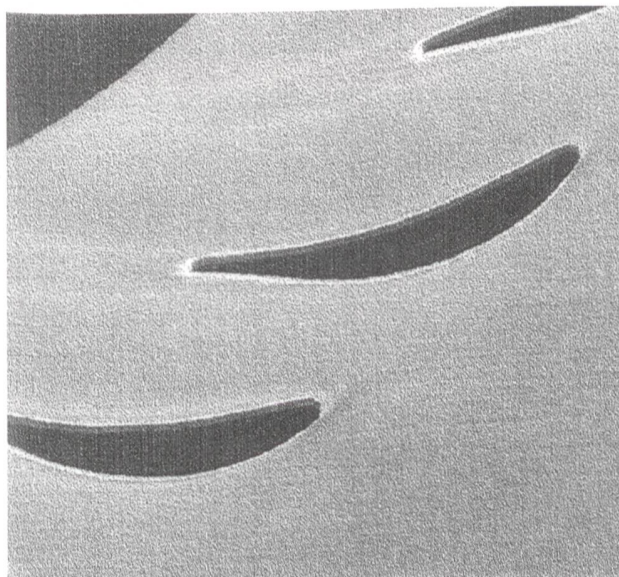


Bild 5 Berechnete Verteilung der hydraulischen Verluste innerhalb des modifizierten Stützschaufelrings.

vermeiden, was deutlich geringere Verluste zur Folge hatte.

Die Ergebnisse der Stützschaufelmodifizierung auf Basis der Strömungsberechnung nach Navier-Stokes wurde anschließend Modellmessungen gegenübergestellt, siehe Bild 6. Die mit Navier-Stokes errechnete Wirkungsgradsteigerung berücksichtigt nur das Stützschaufelgitter, während die Gesamtsteigerung mit dem semi-homologen Modell auch die Steigerung aufgrund der verbesserten Einströmungsbedingungen zum Leitapparat und dem Laufrad berücksichtigt – nach Modifizierung der Stützschaufeln. Dadurch erklärt sich der Unterschied der beiden Kurven.

Die Kombination vom Laufradersatz und Stützschaufelmodifizierung führte zu einer Steigerung des Wirkungsgrads im Bestpunkt um insgesamt 6,5%.

Wie Anlagenmessungen ergaben, wurden die Leistungsgarantien für das Ersatzlaufrad erfüllt (Bild 7). Die erhebliche Wirkungsgradsteigerung und die entsprechende zusätzliche jährliche Energieerzeugung bewirkten für die Modernisierung dieser Maschine eine Amortisationsdauer von etwa fünf oder gar vier Jahren (bei Kombination mit einer allgemeinen Überholung).

Birsfelden

Turbinentyp:	Vertikale Kaplanturbine (4-Schaufler)
Anzahl Einheiten:	4
Lieferjahr:	1952
Land:	Schweiz
Nennfallhöhe:	7,3 m
Nennleistung:	22,2–22,8 MW
Synchrondrehzahl:	68,2 U/min
Laufraddurchmesser:	7200 mm

1993 erhielt Sulzer Hydro einen Auftrag zur Untersuchung des Modernisierungspotentials der vier Kaplaneinheiten des Kraftwerks Birsfelden. Zwei von ihnen waren ursprünglich durch die ehemalige Sulzer Escher Wyss, heute Sulzer Hydro, geliefert worden.

Zweck der Analyse war die Entwicklung eines neuen Laufradprofils mit einem höheren Wirkungsgrad und einem besseren Kavitationsverhalten. Das neue Laufrad sollte angesichts der Möglichkeit einer Senkung des Unterwasserspiegels im Falle entsprechend geänderter Betriebsbedingungen ein annehmbares Kavitationsverhalten aufweisen.

Sulzer Hydro bediente sich in diesem Falle ihres bewährten Dreiphasenvorgehens: In einem ersten Schritt wurden mittels CFD und unter Verwendung der Eulerschen Gleichungen neue Laufschaufeln entwickelt. Das ursprüngliche Turbinenlaufrad von Escher Wyss wurde mathematisch modelliert und mit dem neuen verglichen.

Die Ergebnisse zeigten:

- Eine massgebliche Verbesserung des Wirkungsgrads
- Ein verbessertes Kavitationsverhalten, das einen höheren Durchfluss zuließ, wodurch sowohl beim aktuellen als auch bei einem niedrigeren Unterwasserspiegel die maximale Generatorleistung erreicht werden konnte.

Für die übrigen beiden Turbinen wurden ebenfalls mittels CFD neue Schaufeln entwickelt. Hier musste das neue hydraulische Profil des Laufrades genau auf das bestehende, etwas eigentümliche Saugrohr abgestimmt werden.

In einem zweiten Schritt wurden 1993 Modellversuche in einem unabhängigen Labor durchgeführt, um die garantierten Werte für alle Einheiten nachzuweisen. Sie wurden als semi-homologe Tests durchgeführt, da das Spiralgehäuse und die Leitschaufeln nicht mit den entsprechenden Prototypen identisch waren, sondern nur bezüglich der hydraulischen Verluste äquivalent waren.

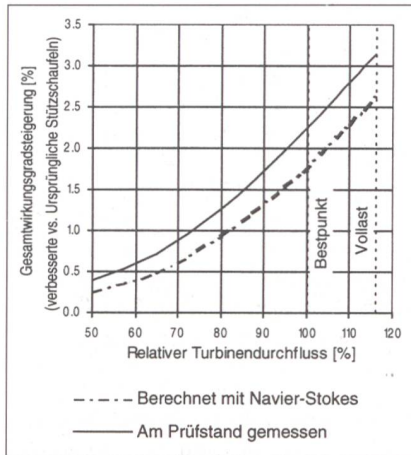


Bild 6 Verbesserung des Gesamtwirkungsgrads infolge der Stützschaufelmodifizierung.

Bei den beiden Einheiten, die nicht ursprünglich von Escher Wyss stammten, ergab die Feinabstimmung zwischen den neuen Schaufeln und dem bestehenden Saugrohr ein Verbesserungspotential von bis zu 1,7%. Somit konnten auch diese aufgerüsteten Einheiten die maximale Generatorleistung erreichen und bei Betrieb mit Vollast oder Überlast trotzdem noch ein hervorragendes Kavitationsverhalten aufweisen.

Die Versuchsergebnisse der Escher-Wyss-Einheiten wurden von den Vertretern des Kunden und des Beraters abgenommen. Die neuen Laufradprofile erreichten eine Wirkungsgradsteigerung bis 2% im Bestpunkt und bis 1,5% bei Vollast sowie eine Erweiterung der Kavitationslimiten (Bild 8). Dies erlaubte eine Steigerung der jährlichen Energieerzeugung des ganzen Kraftwerks bei bestehendem Unterwasserspiegel um rund 4,2% bzw. im Falle eines gesenkten Unterwasserspiegels um rund 9%. Die geforderten Garantien waren somit erreicht bzw. übertroffen.

Aufgrund der positiven Testergebnisse beschloss der Kunde, die vorgeschlagene Lösung in einem dritten Schritt zu implementieren, und erteilte Sulzer Hydro den Auftrag zur Herstellung der neuen Schaufeln mit zwei verschiedenen Profilen für die vier Einheiten, und zwar verbunden mit einer generellen Sanierung. Das erste aufgerüstete Laufrad wurde 1996 installiert. Die nächsten folgten im Abstand von einem Jahr. Das letzte wird dieses Jahr geliefert.

Die Modernisierung von Birsfelden zeigt die Wirksamkeit und Flexibilität des angewandten schrittweisen Vorgehens von Sulzer Hydro. Der Kunde konnte den Prozess laufend überwachen und die Implementierung der Lösung erst dann beschliessen, wenn für ihn feststand, dass die garantierten Werte auch

erreicht würden. Er besass dadurch eine solide Basis für die finanzielle Machbarkeit des Projektes. Die Amortisationsdauer wurde für das Modernisierungsprojekt von Birsfelden auf 1,5 Jahre geschätzt. Der Kunde nahm die Modernisierung sogar ein Jahr vor dem ursprünglich aufgestellten Zeitplan in Angriff, so dass dies für ihn zweifellos zu einer äusserst lohnenden Investition wurde.

Schlussfolgerung

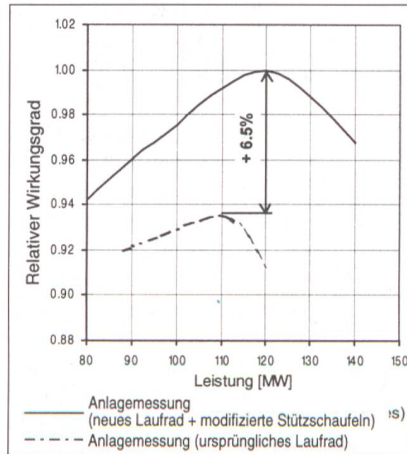


Bild 7 Wirkungsgradvergleich der beiden Laufradgenerationen.

Wie die erwähnten Beispiele zeigen, bestehen zahlreiche verschiedene Modernisierungsszenarien. Der maximale Vorteil für den Kunden ergibt sich aus einer massgeschneiderten Lösung, die in enger Zusammenarbeit zwischen dem Anlagenbesitzer und dem Turbinenlieferanten bereits im Planungsstadium vollständig ausgearbeitet und evaluiert wird.

Ausserdem kann die Aufrüstung bestehender Turbinen mit neu entwickelten Laufrädern eine erhebliche, zusätzliche

Energieerzeugung ermöglichen. In diesem Zusammenhang ist heute die numerische Strömungssimulation ein Schlüsselinstrument unter den Laufrad-Entwicklungstechniken.

Das Verbesserungspotential für bestehende Kraftwerke ist enorm gross. Um diese neue Form alternativer Energie zu nutzen, sollte jedes einzelne von ihnen hinsichtlich entsprechender Modernisierungsmöglichkeiten untersucht werden.

Literatur

- [1] PK. Doerfler, E. Reisner: Managing the Grid (International Water Power & Dam Construction, Juni 1996).
- [2] H. Keck, E. Göde, J. Pestalozzi: Experience with 3D-Euler Flow Analysis as a Practical Design Tool (IAHR-Symposium, Belgrad 1990).
- [3] E. Göde, M. Eichenberger, A. Sebestyen: Advances in Runner Design for Turbines and Pump turbines using a Numerical Test Rig (Waterpower '93, Nashville).
- [4] A. Sebestyen, H. Keck: Uprating of Ultra-Low Head Francis Units Based on Numerical Flow Analysis (Waterpower Conference, Nizza 1995).
- [5] H. Keck, R. Cuénod, R. Grunder: Runner Replacement in Hydropower Plants: A New Energy Source (Wasserwirtschaft 85, 1995).

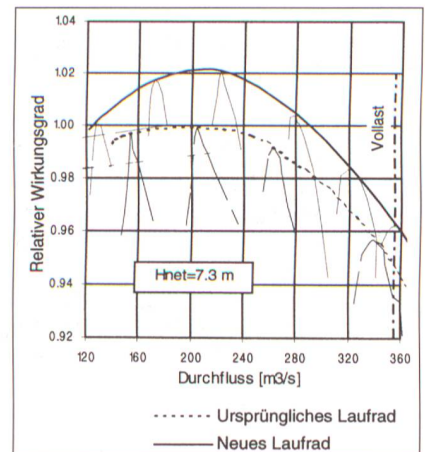


Bild 8 Wirkungsgradvergleich der beiden Laufradgenerationen.

Moderniser les centrales hydroélectriques: en faveur d'une forme d'énergie renouvelable et profitable

En équipant les turbines existantes de roues mobiles nouvellement développées, on peut permettre une production d'énergie supplémentaire considérable. Dans ce contexte, la simulation numérique de l'écoulement est un instrument décisif pour les ingénieurs de développement de roues de turbine.

L'amélioration potentielle pour les centrales existantes est énorme. Pour valoriser cette nouvelle énergie alternative, il faut procéder à un examen des possibilités de modernisation adaptées à chacune d'elles.