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: 93 (2002)

Heft: 18

Artikel: Erfahrungsgestützte Aufwertung von Peltonlaufrädern

Autor: Müller, Jürg / Ursin, Max

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-855448

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: 09.12.2025

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

Erfahrungsgestützte Aufwertung von Peltonlaufrädern

Moderne Peltonlaufräder haben höchste Qualitätsstandards erreicht und die Laufradbemessung, wie die Formgebung der Becher, sind wohl nahe am theoretischen Optimum. Die Simulationen der Hochgeschwindigkeitsströmungen mit den heute zur Verfügung stehenden ausgereiften nummerischen Modellen sowie Laborversuchsstände geben ein gutes Abbild der Wirklichkeit. Die Erfahrungen der Turbinenwerkstatt der KWO zeigen, dass die letzten Schritte der Optimierung eines Laufrades nur in der Praxis erfolgen können, und zwar durch eine sukzessive, sich über mehrere Revisionszyklen erstreckende Aufwertung des Laufrades. Der Mehraufwand einer solchen Optimierung gegenüber einer blossen Reproduktion der Becherform ist verhältnismässig klein. Infolgedessen ist der Nutzen wirtschaftlich höchst interessant.

■ Jürg Müller und Max Ursin

Einleitung

Ein Peltonrad ist, auch nach den 120 Jahren Erfahrung seit seiner Erfindung, nicht einfach ein Standard-Industrieprodukt, das Jahrzehnte Betrieb garantiert schadenfrei überdauert. Beharrlich im Bestreben, noch höhere Wirkungsgrade und längere Standzeiten zu erreichen, arbeiten Forscher an Hochschulen und bei den Herstellern noch immer an der Verbesserung der Laufräder (Bechergeometrie, Materialien, Optimierung des Herstellungsprozesses) sowie an der Verbesserung der Umgebung des Laufrades in der Turbine (Strahl, Einläufe, Nadeldüsen, Krümmer, Gehäuse) [1]. Die heutigen Laufräder haben höchste Qualitätsstandards erreicht und sowohl die Laufradbemessung als auch die Formgebung der Becher sind wohl nahe am theoretischen Optimum. Dank der Simulation von Hochgeschwindigkeitsströmungen mit den heute zur Verfügung stehenden, ausgereiften nummerischen Modellen [2] sowie den Laborversuchsständen entsteht ein immer besseres Abbild der Wirklichkeit. Damit wird die Weiterentwicklung der Peltonräder vorangetrieben.

Adresse der Autoren
Jürg Müller und *Max Ursin*
KWO, Kraftwerke Oberhasli AG
Postfach 63
3862 Innertkirchen

Aber all diesen Modellen und Simulationen haftet ein Makel an: Die Wirklichkeit ist eben doch nicht genau so. Erst der Gebrauch des Rades im Kraftwerk bringt mit Deutlichkeit ans Licht, wenn etwas an der Form, am Material oder in der Umgebung vom Optimum abweicht. Die Erfahrungen der Turbinenwerkstatt der KWO zeigen, dass die letzten Schritte der Optimierung eines Laufrades nur in der Praxis erfolgen können, und zwar durch eine sukzessive, sich über mehrere Revisionszyklen erstreckende Aufwertung des Laufrades. Diese Aufwertung stützt sich auf die Beurteilung der spezifischen Schadensbilder bzw. Abnutzungserscheinungen am «eingefahrenen» Rad, das die konkreten Einsatzbedingungen in der Turbine widerspiegelt. Aufgrund langjähriger Erfahrung können aus den Schadensbildern Rückschlüsse für die Verbesserung der Bechergeometrie gezogen werden.

In diesen letzten Optimierungsschritten lassen sich oft überraschende Erfolge erzielen: Verbesserungen der Standzeiten um einen Faktor zwei und eine damit einhergehende Erhöhung des Wirkungsgrades können, je nach Ausgangszustand, erreicht werden. Der Mehraufwand einer solchen Optimierung gegenüber einer blossen Reproduktion der Becherform ist verhältnismässig klein. Infolgedessen ist der Nutzen wirtschaftlich höchst interessant.

Ursachen reduzierter Standzeiten und Wirkungsgrade bei Peltonrädern

Die detaillierte Wirklichkeit des Laufrades in einer Turbine entzieht sich aufgrund der Komplexität einer perfekten Modellierung [3]. Laufräder, die einige

Bild 1 Schadensbeginn: sanfte Wellenbildung, die ihren Ursprung in den Unstetigkeiten des Materials und der Form hat.

Bild 2 Die Amplitude der Wellen wird im Verlauf der Schadensentwicklung immer akzentuierter, bis sich im Endstadium Schuppen bilden, im Bild ähnlich wie eine Luftaufnahme einer Dünenlandschaft mit sanften Rücken und Tälern und scharfen Graten.

Bild 3 Ein weiterer Schadensmechanismus ist der Tropfenschlag. Dabei schlagen Wassertropfen, weil sie immer wieder auf die selbe Stelle im Laufrad geschleudert werden, Dellen aus dem Laufrad heraus. Die Ursache kann in einem divergierenden Strahl liegen, der an seiner Aussenseite «ausfranst», kann aber auch von einer stumpfen Mittelschneide herrühren, die bewirkt, dass der Strahl nach Aufprall auf der Schneide sich teilweise in Tropfen auflöst.

Bild 4 Becherbruch.

Zeit in Betrieb waren, geben dem Experten aber eine Ahnung dieser Wirklichkeit. Was man an Schäden an der Oberfläche beobachten oder durch andere Prüfverfahren indirekt erkennen kann, mag allerlei Gründe haben: Das Material und seine Eigenschaften, die Dimensionen und die Geometrie des Rades und der Becher, die Qualität der Fabrikation, die Belastung des Laufrades im Kraftwerk mit den Eigenschaften des Wassers und die Betriebsbedingungen wie Lastwechsel und An- und Abstellvorgänge. Jede dieser Kategorien spaltet sich wiederum auf in ein Spektrum von verschiedenen anderen kausalen Zusammenhängen, die ein Schadensbild erklären können.

Schadensmuster

Jedes Laufrad erfährt mit der Zeit Schäden. Die Absicht der Aufwertungsarbeit liegt in der zeitlichen Verzögerung der Schadensentwicklung, sprich der Verlängerung der Standzeiten.

Schäden beginnen dort, wo Fehler vorliegen. Unstetigkeiten der Geometrie – ein Ausrutscher des Schleifers, eine kleine Gaspore entstanden während der Schweissarbeit – alles, was den perfekten Fluss des Wassers im Becher stört, birgt den Keim des Schadens. Die Schadensmechanismen sind nicht sichtbar oder die Schadensinterpretation wird wesentlich schwieriger, falls das Rad gegen Verschleiss beschichtet wurde.

Ein jeder Schadensmechanismus wird begleitet und beschleunigt durch die abrasive Kraft des Wassers, abhängig von den geologischen Verhältnissen im Einzugsgebiet des Kraftwerkes. Bei Geschwindigkeiten des Wassers von bis zu 500 km/h am Becher sieht man leicht ein, dass selbst eine geringe Beimischung von Quarzsand für eine beschleunigte Erosion genügt.

Sind die Strömungsverhältnisse ungünstig, dann beginnt ein Schaden dort, wo Unregelmässigkeiten auf der Oberfläche auftauchen: zum Beispiel unterschiedliche Materialhärten, Poren, Wellen usw. In den Bildern 1 bis 3 werden verschiedene Schadensbilder gezeigt.

Der Schaden und seine Ursachen: Erkenntnisse durch Erfahrung

Von zentraler Bedeutung ist die Geometrie des Rades und der Becher. Wenn man den Wasserstrahl als drallfrei und in seinem Querschnitt als perfekt rund annimmt, was selten der Fall ist, aber die Argumentation hier vereinfacht, dann bestimmt vor allem die Bechergeometrie die Abströmungsverhältnisse des Wassers am Rad. Diese Abströmungsverhältnisse können, wenn sie nicht optimal sind, einen Becher beschädigen oder auch nur Energie vernichten, ohne unmittelbar sichtbare Schäden zu produzieren. Einige Zusammenhänge seien hier kurz erwähnt.

Schneidengeometrie: Eine allzu scharfe Schneide bekommt bald Scharten und diese stören die Strömung. Eine stumpfe Schneide lässt die Strömung von der Oberfläche ablösen. Der zu grosse Eintrittswinkel schafft wellenförmige Abnutzungserscheinungen, der zu kleine Winkel hat wiederum Schneidenprobleme zur Folge.

Ist der **Austrittswinkel** zu gross, dann verlässt das Wasser den Becher, ohne sein Maximum an kinetischer Energie an das Rad abgegeben zu haben. Ist er zu klein, dann könnte der Becherrücken mit Wasser beaufschlagt werden: Energieverlust ist die Folge sowie Schäden an der Becherrückseite.

Ist die dreidimensionale **Geometrie** der Becherschale nicht ganz in Ordnung, dann sind nicht nur die Abströmverhältnisse suboptimal, sondern es kann auch die Becherwurzel benetzt werden. Die hochbeanspruchte und deshalb rissanfällige Becherwurzel sollte zwecks Vermeidung von Korrosion nicht dauerbeaufschlagt sein.

Schäden beginnen oft im **Austrittsbereich** der Becher. Die Grenzschicht an der Becherform, dort wo die grössten Turbulenzen stattfinden, können wellenförmige Schäden verursachen. Im Endstadium auch Schuppen mit scharfen Kanten.

Der **Strahl-Anschnitt** muss so gestaltet sein, dass Spannungen im Wurzelbereich, erzeugt durch das Eintreten des Strahles in den Becher, möglichst kontinuierlich zu- und abnehmen. Schlagartige Spannungsveränderungen fördern die Rissbildung oder erzeugen auch Schwingungen. Zusätzliche Schwingungen des Rades, was zu einer beschleunigten Rissbildung führen kann, werden durch das wechselseitige Beaufschlagen der Vorder- und Rückseite eines Bechers bewirkt. Im ungünstigsten Fall kann aufgrund der Düsenanzahl, Becheranzahl und durch den zeitgenauen Schlag des Wasserstrahls auf die Becher/Innen- und Rückseite die Eigenschwingungsfrequenz des Rades erreicht werden. Fatale Schäden sind die Folge (Bild 4).

Ebenfalls zur Interpretation der Schadensbilder und zur Rekonstruktion der möglichen Gründe gehört der Vergleich der Originalform des Rades mit den abgenutzten, erodierten Bechern. Wenn die Original-Lehren nicht vorhanden sind, dann müssen sie nachgebaut werden. Die Becher- und Radformen und auch «Philosophien» der verschiedenen Ingenieure, die Peltonräder dimensionierten, sind dem Experten bekannt. Die Formen leiten sich alle vom ursprünglichen Peltonbecher ab und wurden verfeinert. Es gibt die eher flachen und breiten Becher der «Vevey» und die tiefen und langen Becher der «Escher-Wyss». Jede Becherform ist ein ausgeklügelter Kompromiss zwischen Belastungen, Abströmverhältnissen und Wirkungsgraden. Das Problem ist knifflig, denn das Laufrad, das alle Kriterien perfekt erfüllt, existiert nicht.

Schrittweise Optimierung der Becherform

1. Laufrad-Bildhauer ans Werk

Die Geometrie soll dergestalt verändert werden, dass die Schadensbilder nicht mehr, oder vermindert und zeitlich stark verzögert auftreten. Dazu ist nicht nur die Kenntnis der Zusammenhänge der Schadensmechanismen wichtig, sondern auch die Überprüfbarkeit einer verbesserten Formgebung.

Scheint der Schadensmechanismus klar, kann eine verbesserte Becherform hergeleitet werden. Diese neue Becherform wird modelliert. Ein Teil der Arbeit geschieht am Computer: Strahleintrittsbereich und Austrittskantenverlauf werden im CAD-System für die gegebenen Laufrad- und Strahldimensionen und Druck- und Wasservolumina ausgebildet.

Der zweite Schritt ist Handwerk: Man belegt den abgenutzten Becher mit einem geeigneten Material und formt die Oberfläche in der optimierten berechneten Form sowie in den vom Experten vermuteten Verbesserungen der Geometrie.

2. Ein volldimensionaler Prüfstand: Der Schlüssel für eine schrittweise Optimierung

Das Laufrad mit dem belegten Becher wird mit einem wirklichkeitsgetreuen Wasserstrahl beschickt. Das Rad selbst kann mit beliebiger Geschwindigkeit gedreht werden, so können auch Teillastzustände oder Lastwechsel untersucht werden. Der Strahl trifft nicht mit der gleichen Strömungsgeschwindigkeit und den gleichen Druckverhältnissen wie in der Realität auf das Rad, doch mit den korrekten Dimensionen und der dazu passenden Drehgeschwindigkeit des Rades. Eine Hochgeschwindigkeitskamera hält die Strömungsmuster am modellierten Becher fest.

3. Optimierung der Bechergeometrie

Das aufgetragene Material auf den abgenutzten Bechern lässt sich schnell ergänzen oder abtragen, das Rad bleibt im Prüfstand und kann nach der Veränderung gleich wieder getestet und analysiert werden (Bild 5). Nach mehreren Zyklen erkennt das Auge des Experten: Keine Strömungsablösungen, akzeptable Verwirbelungen, keine störenden Abflüsse, die Becherwurzeln und Becherrücken bleiben unbenetzt, der Anschnitt erfolgt kontinuierlich, der Strahl wandert zentriert und gleich bleibend über die Schneide Richtung Wurzel, die Wasserlamina an den Becheraustritten ist optimal geformt. Der verbesserte Wirkungsgrad lässt sich über einen Bremsmotor im hydraulischen Versuchsstand messen.

Die Bahnen einzelner Wasserteilchen, die vom Strahl kommend über die Becherform strömen, bis sie schliesslich hinaus ins Unterwasser fallen, sind höchst kompliziert. Alles bewegt sich: Das Teilchen selbst, verschiedene Schichten der Wasserlamina relativ zu einander und auch das Rad selbst dreht sich. Ist das Wasserteilchen Teil der turbulenten Grenzschicht direkt am Becher, so erfährt es andere Kräfte und erzeugt damit andere Effekte, wie wenn es sich inmitten von Seinesgleichen im Strahl befindet. Um solche Bahnen besser erkennbar zu machen, und Verlauf und Form der Grenzschicht und der Wasserlamina besser zu sehen, kann der volle Strahl im Prüfstand in Kleinstrahlen aufgeteilt werden. Über die Hochgeschwindigkeitskamera, gekoppelt an das drehzahlregulierte Stroboskop, wird so der Weg einer «Teilchengruppe» am laufenden Rad erkennbar gemacht.

Sagt das Schadensbild etwas über die mangelnde Qualität des Strahls im Kraftwerk aus, und kann diese Qualität nicht kostengünstig durch Anpassungen am Krümmer, dem Gehäuse oder den Nadeldüsen usw. verbessert werden, dann ergeben sich abermals Korrekturen an der Becherform, die mit dem volldimensionalen Prüfstand verifiziert werden können.

Bild 5 Vollbeaufschlagte korrigierte Schaufel im volldimensionalen Prüfstand.

4. Roboter- und Fräsarbeiten

Die optimierte Becherform wird danach mit einem Messarm ausgemessen und in einem CAD-System zu Bewegungsbefehlen für die Bearbeitungsmaschinen programmiert (Bild 6). Bewegungsbefehle für den Roboter, der die groben Schweissarbeiten erledigt, oder für die Fahrständerfräsmaschine, die Auftragsschweissung wieder bis zu $^{5}/_{10}$ mm in die Nähe der gewünschten Becherform abspant. Unzugängliche Stellen, vor allem im Wurzelbereich der Becher, werden von Hand nachgeschweisst bzw. abgeschliffen.

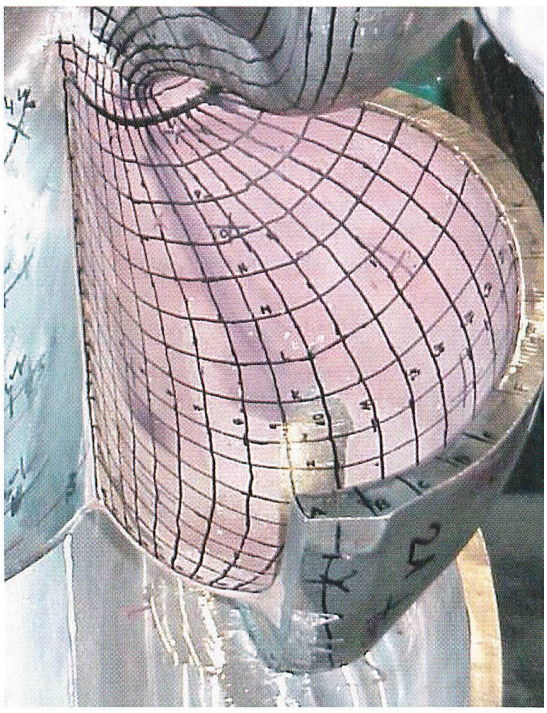

Bild 6 Optimierte Geometrie eines Peltonbechers, bereit zum Abtasten mit dem Robotermessarm.

KWO-Turbinenworkshop 2002 (Donnerstag, 24. Oktober)

Praxisorientierter Workshop für Kraftwerksbetreiber zu den im Artikel beschriebenen Themen. Mit weiterbildenden Referaten und überraschenden Demonstrationen zur Laufradaufwertung, Robotertechnik, Beschichtungstechnik und zum hydraulischen Prüfstand.

Anmeldung und Information: KWO Innertkirchen, Telefon 033 982 20 11.

5. Immer wieder: prüfen, kontrollieren und nochmals prüfen

Zwischen den verschiedenen Arbeitsgängen werden wiederholt die Formtreue, allfällige Risse und Deformationen, kontrolliert (Bild 7). Kompensationsschweissungen und andere Massnahmen zur Stabilisierung der Becherform werden frühzeitig ergriffen. Eine Aufgabe der Qualitätssicherung.

6. Finish: Der Fachhandwerker bringt das Rad ans Qualitätsziel

Das Handfinish bleibt die Krönung der Qualitätsarbeit (Bild 8). Die Güte der Oberfläche muss sich den Gegebenheiten des Kraftwerks anpassen. Ist die Qualität des Wassers gut, dann muss auch die Oberfläche nahezu perfekt sein. Kleinste Unstetigkeiten in der Oberfläche lassen den Schadensprozess frühzeitig anspringen.

Ist die Schwebstofffracht gross, dann kann eine selektive oder komplette Härtung der Becheroberfläche mit Wolfram-Carbid erwogen werden. Auch für ein Rad, das beschichtet werden muss, gilt aber, dass zuerst die hydraulische Form optimal ausgebildet werden muss, denn Wirkungsgradverbesserung und Standzeitverlängerung ist primär eine Frage der optimalen Form und nicht der verschleissarmen Oberfläche. Die optimierte Form kann mit der Verschleissbeschichtung «eingefroren» werden. Die längeren Standzeiten ergeben sich dann aus einer gelungenen Kombination von Form und Beschichtung.

Von der Beschichtung eines geometrisch suboptimalen Rades ist abzusehen, denn die Schadensbilder werden durch die Verschleissschicht «verzerrt», Geometriefehler und damit Wirkungsgradverluste sind nicht mehr eindeutig erkennbar.

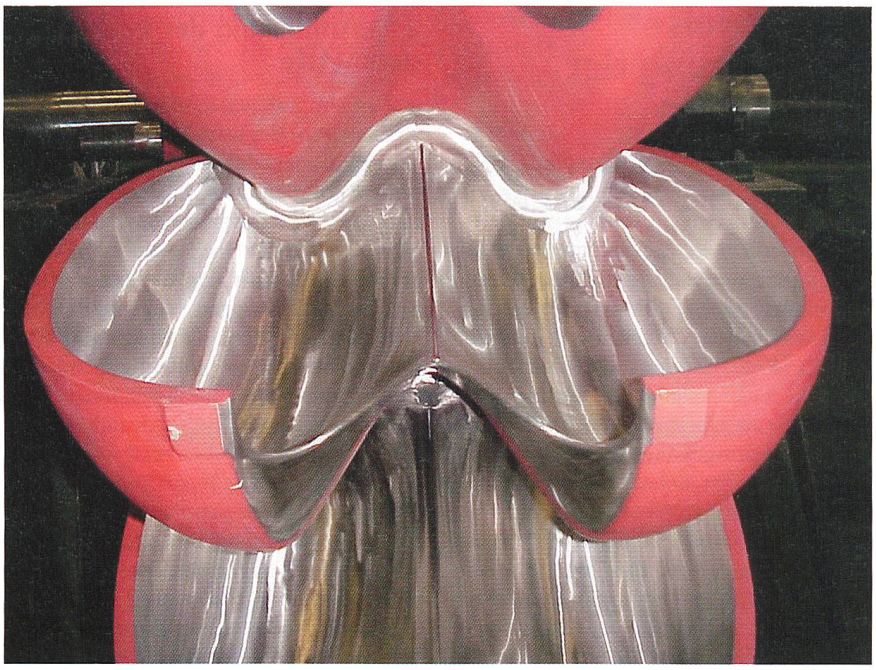

Bild 8 Das fertig polierte Laufrad: Besserer Wirkungsgrad, längere Standzeiten.

Zusammenfassung

Die nummerische Modellierung von Strömungen an einem Peltonbecher und andere Computermodelle sind unerlässlich für eine qualitativ hochstehende Bemessung. Um maximale Standzeiten und höchste Wirkungsgrade zu erreichen, ist die Computermodellierung aber nicht hinreichend. Dieses Qualitätsziel kann erst durch die erfahrungsgestützte Aufwertung des Laufrades erreicht werden, eine Arbeit, die sukzessive geschieht und sich über mehrere Revisionszyklen erstrecken kann.

Die Aufwertung stützt sich auf die Beurteilung der spezifischen Schadensbilder bzw. Abnutzungserscheinungen am «eingefahrenen» Rad, die die konkreten Einsatzbedingungen des Rades in seiner Turbine wiederspiegeln. Aufgrund langjähriger Erfahrung können aus den Schadensbildern Rückschlüsse für die Verbesserungsmöglichkeiten der Bechergeometrie gezogen werden.

Literaturverzeichnis

[1] *Risberg, S.; Rommetveit, O.; Haugen, J.O.: Brekke, H.*: Competitive design of high performance Pelton turbines. Proceedings, IAHR Symposion, Charlotte, North Carolina, 2000.

[2] *Mirjam Sick, Helmut Keck, Gérald Vullioud, Etienne Parkinson*: New Challenges in Pelton Research. Paper published in the proceedings of Hydro 2000 Congress, Bern, Switzerland.

[3] *Gotfred Berntsin, Hermond Brekke, Jan Otto Haugen, Stale Risberg*: Analysis of free surface non-stationary flow in a Pelton turbine. Proceedings of Hydro 2001 Congress, Riva, Italy.

Bild 7 Rissentwicklung an der Becherwurzel.

Revalorisation des turbines Pelton

Les turbines Pelton modernes ont atteint les standards de qualité les plus élevés et le dimensionnement ainsi que la forme de l'auget approchent de l'optimum théorique. Les simulations d'écoulements à grande vitesse au moyen, d'une part, des modèles numériques actuellement à disposition et, d'autre part, des essais en laboratoire reflètent bien la réalité. Les expériences réalisées dans l'atelier des turbines de la KWO révèlent que les dernières étapes d'optimisation d'une roue ne peuvent être réalisées que dans la pratique; c'est-à-dire par le biais d'une revalorisation échelonnée au cours de plusieurs cycles de révision successifs. L'excédent de coûts d'une telle optimisation par rapport à une simple reproduction de la forme de l'auget est minime. C'est la raison pour laquelle l'utilité au niveau économique est des plus intéressantes.