

Zeitschrift: bulletin.ch / Electrosuisse

Herausgeber: Electrosuisse

Band: 99 (2008)

Heft: 17

Artikel: Die Hydromechanik von Peltonturbinen

Autor: Zhang, Zhengji

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-855881>

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: 08.02.2026

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

Die Hydromechanik von Pelton turbines

Rechnerische Ansätze, wie die Effizienz verbessert werden könnte

Pelton turbines eignen sich bei grossen Fallhöhen und sind dementsprechend verbreitet in der Schweiz. Da sich sowohl das Wasser im Strahl als auch die Turbinenschaufel bewegen, ist eine Berechnung der Hydromechanik aber schwierig; die Turbinen wurden bislang anhand von experimentellen Erkenntnissen ausgelegt. Mit den geeigneten Vereinfachungen, indem beispielsweise der Wasserstrahl in Schichten zerlegt wird, lässt sich die Hydromechanik jedoch sehr wohl berechnen. Diese Berechnungen liefern wiederum Hinweise, wie die Effizienz weiter verbessert werden könnte.

In der Schweiz werden 60% des Stroms aus Wasserkraft erzeugt [1]. Länder wie Norwegen produzieren ihren Strom fast ausschliesslich mit hydraulischer Energie. Und da Wasser eine erneuerbare Energieform ist, wird sie auch in Zukunft wichtig

Zhengji Zhang

bleiben – weltweit werden neue Wasserkraftwerke gebaut. Laut Bundesamt für Wasserwirtschaft stösst der Ausbau der Wasserkraft in der Schweiz jedoch seit den 70er-Jahren an die politischen und wirtschaftlichen Grenzen [2]. Daher fokussiert sich die Elektrizitätswirtschaft seither, neben dem Ausbau der Kleinwasserkraft, auf die Optimierung und Leistungserhöhung bestehender Anlagen.

Von den verschiedenen hydraulischen Turbinen zählen die Pelton turbines zu den wichtigsten und wohl am weitesten verbreiteten (Bild 1). Die erste Pelton turbine wurde von Lester Allan Pelton im Jahr 1879 erfunden und getestet. Sie wandeln seit über 100 Jahren zuverlässig hydraulische Energie in mechanische Arbeit um und erzeugen so Elektrizität. In dieser Zeit haben Forschung und Praxiserfahrungen dazu beigetragen, dass Pelton turbines heute ein hohes Leistungsniveau mit einem Wirkungsgrad von über 90% erreichen. Diese Wirkungsgrade gehen auf Laborversuche, die praxisnahe Beobachtung von Strömungsvorgängen sowie die Erfahrungen von Kraftwerksbetreibern zurück. In der

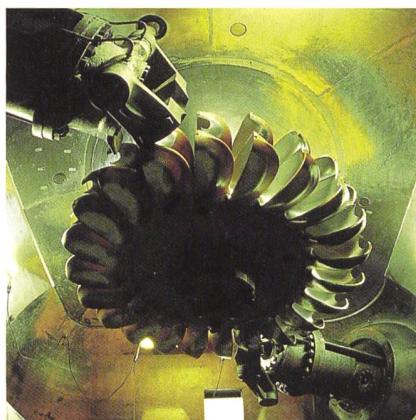


Bild 1 Pelton turbine with two nozzles.

Schweiz sind die Pelton turbines in der Alpenregion weit verbreitet. Zum Teil stehen sie mit ihrer Originalauslegung seit mehr als einem halben Jahrhundert in Betrieb. Im Zusammenhang mit der Erneuerung von Pelton turbines stehen zwei Ziele an: Auf der einen Seite wird versucht, die Geometrie zugunsten einer idealen Strömung und damit zur Erhöhung des Wirkungsgrades auszulegen, auf der anderen Seite soll die Lebensdauer verlängert werden im Hinblick auf Abrasion und Kavitation. Konkret wird eine abrasions- und kavitationsfreie Auslegung der Schaufelgeometrie angestrebt und eine Beschichtung der Schaufeloberfläche mit harten Materialien vorangetrieben.

Die Hydromechanik ist die Kerntechnologie zur Auslegung von Pelton turbines. Diese umfasst die Strömung des Wasserstrahls von der Düse bis zum Austritt aus den Pelton-schaufeln. Weil die derartige Hydromechanik hochkomplex ist, vor allem wegen der Rotation des Rades, hat sie in der Praxis bisher keine umfassende Anwendung gefunden. Die heute erreichten Wirkungsgrade gehen hauptsächlich auf die praxisnahe Verbesserung des Wasserstrahls und die Optimierung der Interaktion zwischen Wasserstrahl und rotierenden Pelton-schaufeln zurück. Die numerische Strömungssimulation mittels Computer (CFD) hilft, die Strömungsprozesse zu visualisieren, kann aber die Physik der komplexen Strömungsvorgänge nicht umfassend beschreiben. Infolge der unvollständigen theoretischen Anwendung der Hydromechanik ist es bis heute kaum möglich, die verschiedenen Verlustquellen in einem Turbinensystem zu identifizieren und die jeweiligen Verluste zu quantifizieren. Es ist daher stets schwierig geblieben, den Wirkungsgrad gezielt zu erhöhen. So konnte die Frage über die Wirkung der Strömungsreibung an der Schaufeloberfläche auf den Systemwirkungsgrad bis vor Kurzem nicht beantwortet werden.

Neue Perspektiven in der Hydromechanik

Die Hydromechanik in einer Pelton turbine umfasst zwei Prozesse:

- Die des Freistrahls inklusive dessen Generierung beim Injektor
- und die Hydromechanik der Interaktion zwischen dem Wasserstrahl und den rotierenden Schaufeln sowie der Wasserströmung in den Schaufeln.

Die Basis der Hydromechanik des Freistrahls ist die Bernoulli-Gleichung, nach der die Strahlgeschwindigkeit berechnet werden kann. Ein realer Wasserstrahl zeichnet sich jedoch durch verschiedene Merkmale aus, wie die Strahlerweiterung, die Instabilität oder die ungleichmässige Geschwindigkeitsverteilung im Strahlquerschnitt. Bild 2 zeigt die mit der Lasermethode gemessene Geschwindigkeitsverteilung in einem Wasserstrahl [3]. Diese Messmethode gilt heute als genaueste. Es ist zu erkennen, dass die über den Querschnitt gemittelte Geschwin-

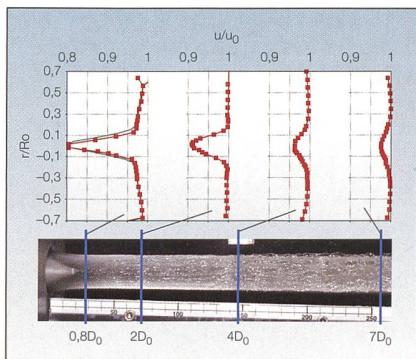


Bild 2 Geschwindigkeitsprofil im Wasserstrahl.

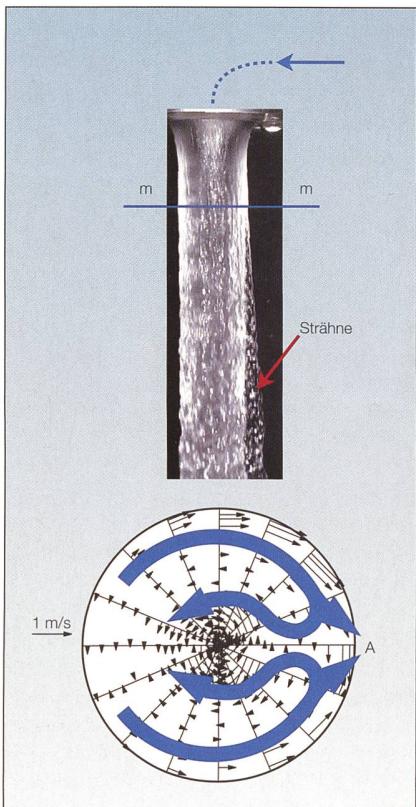


Bild 3 Strähne, die durch den Drall im Wasser entsteht.

digkeit und daher die kinetische Energie des Strahls während des Fortlaufens nahezu unverändert bleibt. Mit anderen Worten bleibt der Strahldurchmesser nahezu konstant. Seit Langem spricht man jedoch aufgrund von Beobachtungen von einer Strahlerweiterung mit einem Erweiterungswinkel von etwa $0,2^\circ$ bis $0,5^\circ$. Dies ist aber nicht realistisch, denn eine gleichmässige Strahlerweiterung von $0,2^\circ$ würde einen Verlust an kinetischer Energie von etwa 11% nach einer Lauflänge von 4-mal dem Strahldurchmesser bedeuten, was undenkbar ist. Eine realitätsnähere Reduktion der kinetischen Energie von 1% entspricht einem Erweiterungswinkel von $0,02^\circ$. Aus diesem Grund kann geschlossen werden,

dass die in der Praxis beobachtete Strahlerweiterung nur das Scheinbild der Mischung von Wassertropfen und Luft zeigt und sich auf die Strahloberfläche beschränkt. Der Strahl kann somit als kompakt und konstant angesehen werden.

Fast vor allen Injektoren bei Peltonturbinen befinden sich Rohrkrümmungen, die einen Drall in der Wasserströmung hervorrufen. Aus dem Drallerhaltungssatz bleibt dieser auch im Freistrahlg bestehen. Bild 3 zeigt den aus Lasermessungen festgestellten Drall als Querbewegung im Freistrahlg [4–6]. Es existieren zwei symmetrische Rotationsbewegungen, die sich dort treffen, wo sich die Innenseite der Rohrkrümmung befindet. Wegen der freien Oberfläche des Strahls strebt das Wasser dazu, dem Strahl an der Stelle A zu entkommen. Dadurch entsteht eine lokale Störung an der Strahloberfläche, die als Strähne bezeichnet wird. Trifft diese Strähne auf die Schaufel, kann sie das Material lokal schädigen. Ist die Schaufeloberfläche durch hartes Material beschichtet, kann der Tropfenschlag die Haftung der Beschichtung schwächen, wo-

rauf diese lokal ausbrechen kann (Bild 4). Bei mehrdüsigen Peltonturbinen müssen die nachstehenden Düsen vor dem Tropfenschlag aus den vorangehenden geschützt werden. Das in der Praxis häufig verwendete Schutzdach leidet unter dem starken Tropfenschlag und nimmt Schaden (Bild 5).

Die detaillierten analytischen und experimentellen Untersuchungen an Freistrahlen, wie diese zum Teil in [3–5] und zusammenfassend in [6] präsentiert wurden, haben dazu beigetragen, dass die Hydromechanik des Freistrahls heute nahezu vollständig verstanden wird.

Interaktion Strahl-Schaufel

Zur Hydromechanik von Pelton-Schaufeln gehört in erster Linie die Interaktion zwischen dem Wasserstrahl und den rotierenden Schaufeln. Obwohl in der Auslegung eines Peltonrads die minimale Schaufelzahl rechnerisch leicht bestimmt werden kann, ist die tatsächlich verwendete Schaufelzahl oft deutlich höher, um maximale Wirkungsgrade zu erreichen. Unter der Ansicht, dass bei Peltonturbinen zeitlich stets zwei Schaufeln unter der Beaufschlagung von einem Wasserstrahl stehen, wurde die sogenannte Koinzidenz-Bedingung eingeführt [7, 8], aus der zum ersten Mal ein praxisnahes Kriterium zur Festlegung der Schaufelzahl hergeleitet werden konnte. Dieses Kriterium hat sich an zahlreichen Peltonturbinen bewährt.

Unter der Berücksichtigung der Interaktionszeit des Strahls mit einer Schaufel kann bei einer mehrdüsigen Peltonturbine der mindeste Versetzungswinkel zwischen zwei Düsen für einen störungsfreien Betrieb festgelegt werden. Die entsprechende Be-



Bild 4 Der Tropfenschlag kann die Beschichtung der Schaufel lösen.



Bild 5 Das Schutzdach, das die benachbarte Düse schützt, wird durch die Tropfen beschädigt.

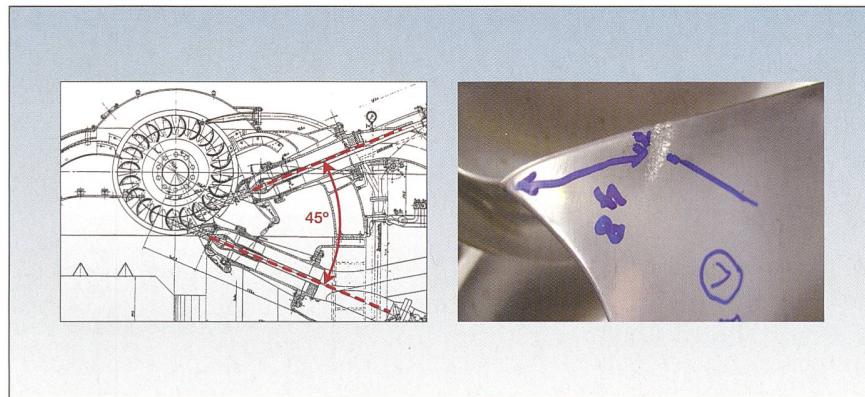


Bild 6 Ein Versetzungswinkel von 45° reicht nicht.

Der Tropfenschlag schädigt die Schaufel, wo die Achsen der beiden Düsen sich treffen. Rechts ein Bild der beschädigten Schaufel.

rechnung wurde in [7, 8] ausgeführt. Die Überprüfung einer bestehenden Pelonturbine nach Bild 6 zeigte, dass für den störungsfreien Betrieb der Versetzungswinkel von 45° nicht hinreichend gross ist. Zum einen ist ein Verlust im Wirkungsgrad unvermeidlich, zum anderen schädigt der Tropfenschlag die Schaufelschneide, und zwar dort, wo sich die zwei Strahlen kreuzen.

Der Wasserfilm auf der Schaufel

Der wichtigste Aspekt in der Hydraulik der Peltonschaufeln ist die kontinuierliche Kraftübertragung vom Wasserstrahl auf das Peltonrad. Dabei wirken ständig die Zentrifugalkraft und die Coriolis-Kraft. Dies erklärt den Unterschied zur Kraftübertragung im Fall der Schaufel ohne Rotation. Rechnerisch können Zentrifugalkraft und Coriolis-Kraft nur schwer berücksichtigt werden, da diese Kräfte in Bezug auf eine Schaufel zeitabhängig und zudem abhängig von individuellen Wasserteilchen sind. Das ist der Grund, dass bisher keine allgemeingültige Aussage über die Wirkung von Zentrifugalkraft und Coriolis-Kraft gemacht werden konnte. Es darf keine der beiden Kräfte bei der Berechnung vernachlässigt werden.

Im Rahmen eines Entwicklungsprojekts bei Grimsel Hydro (KWO) wurde das Strömungsverhältnis in den rotierenden Schaufeln analytisch untersucht. Durch Anwendung des Energiesatzes lässt sich die Wirkung der Coriolis-Kraft automatisch ausfallen. Daraus ist die sogenannte Invarianzgleichung zur Beschreibung der Wasserbewegung in einer Schaufel erstellt worden [7, 8]. Es handelt sich dabei um eine Energiekonstante, die während der Durchquerung einer Strahlschicht durch die Schaufel unverändert bleibt. Dies ermöglicht, dass aus dem Strömungsverhältnis am Schaufeleintritt das Strömungsverhältnis

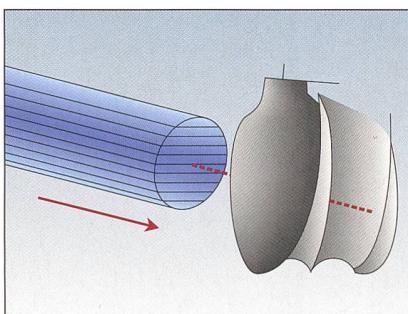


Bild 7 Zur vereinfachten Berechnung wird der Wasserstrahl in Schichten aufgeteilt.

nis sowohl in der Schaufel als auch am Schaufelaustritt berechnet werden kann. Wird ein Wasserstrahl z.B. in 10 Schichten unterteilt (Bild 7), so hat man es nur noch mit 10 Konstanten zu tun. Das entsprechende Rechenverfahren wird als Strahlschichtverfahren bezeichnet. Ohne Anwendung der Invarianzgleichung bzw. des Strahlschichtverfahrens würde die Berechnung enorm aufwendig. Weil die Invarianzgleichung und das damit verbundene Strahlschichtverfahren eine einfache und genaue Strömungsberechnung ermöglichen, tragen sie wesentlich zur Berechnung des Wirkungsgrades bei, wie dies in [7, 8] veranschaulicht wurde.

Weitergehende Berechnungen zeigen, dass für die Hauptströmung in der rotierenden Schaufel die Wirkung von Zentrifugalkraft und Coriolis-Kraft auf die Richtung der Wasserströmung in der rotierenden Schaufel nur geringfügig ist [8]. Dies bedeutet, dass das Strömungsbild in einer fixierten Schaufel (ohne Wirkung der beiden Kräfte) auf die rotierende Schaufel direkt übertragen werden kann. Die Schaufelform kann somit hydraulisch optimiert werden, indem die Schaufel fixiert wird. Dies ermöglicht eine direkte und genaue Beobachtung von komplexen Strömungsvorgängen.

Strömungsreibung verursacht die grössten Verluste

Aufgrund der Zähigkeit des Wassers haftet dieses an jeder soliden Oberfläche. Dadurch entsteht in Pelonturbinen eine Reibungskraft zwischen Wasserströmung und Schaufeloberfläche. Im vorderen Teil der Schaufel als treibende und im hinteren Teil als bremsende Kraft. Und der Reibungseffekt beschränkt sich nicht auf diesen direkten Weg. Wird das rotierende System beobachtet, reduziert die Reibung die Geschwindigkeit des Wasserfilms längs der Schaufeloberfläche. Dies vermindert die Intensität des Energieaustauschs zwischen Wasser und Peltonschaufeln und reduziert den Wirkungsgrad zusätzlich. Offenbar liegt diese Kaskade der komplexen Physik bzw. Hydromechanik der Pelonturbine zugrunde. Vermutlich ist diese Komplexität der Grund dafür, dass erst wenige Arbeiten zur Frage vorliegen, wie und wieweit die Reibung den Wirkungsgrad einer Pelonturbine beeinflusst.

Im Zusammenhang mit dem erwähnten Entwicklungsprojekt bei Grimsel Hydro ist der Einfluss der Reibungseffekte auf den Wirkungsgrad des Systems ausgearbeitet worden. Die gesamte Wirkung der Reibung besteht aus der Summe von direkten und indirekten Wirkungen (Kaskade). Dieses Gesetz wurde als Flow-Friction-Theorem (FFT) bezeichnet [9, 10]. Die Anwendung des FFT an einer Pelonturbine mit vereinfachter, kreisförmiger Schaufelform zeigt, dass die Reibung an der Schaufeloberfläche einen Wirkungsgradverlust von 3 bis 7% verursachen kann (Bild 8, Reibungsbeiwerte $c_f = 0,01$ und $0,02$). Keine andere bekannte Verlustquelle in Pelonturbinen wirkt sich so stark auf den Wirkungsgrad aus. Das FFT bestätigt zudem, dass die Schaufeloberfläche so glatt wie möglich geschliffen werden soll. Die Beschichtung der Schaufeloberfläche durch harte Materialien verstärkt zwar deren Beständigkeit gegen Abrasion, hinterlässt aber oft eine rauhe Oberfläche, die den Wirkungsgrad verkleinert (in den Kraftwerken Stalden und Bitsch wurden $-0,7\%$ gemessen). Diese gegenläufigen Wirkungen sind im Einsatzfall gegeneinander abzuwegen.

Durchgangsdrehzahl

Im Hinblick auf die Betriebssicherheit einer Pelonturbine ist die Durchgangsdrehzahl ein wichtiger Parameter. Diese wird erreicht, wenn alle äusseren Lasten wegfallen: Unter der Strahlkraft beschleunigt sich das Rad bis zur Durchgangsdrehzahl. Die genaue Bestimmung erfolgt bisher fast ausschliesslich durch Messungen in Laborver-

Peltonturbinen

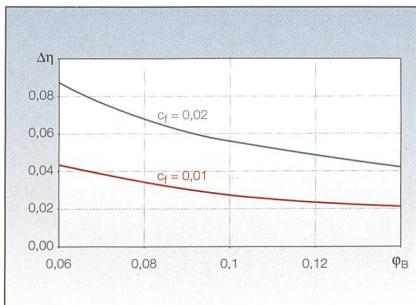


Bild 8 Wirkungsgradverlust bei verschiedenen Reibungswerten c_f .

suchen. Aus der Literatur und anderen Quellen wird die Durchgangsdrehzahl für Peltonturbinen beim 1,8- bis 1,9-Fachen der Nenndrehzahl angegeben. Die Ungenauigkeit beträgt mehr als 5%. Eine Rechenmethode zur genauen Bestimmung der Durchgangsdrehzahl fehlte bisher.

Im Rahmen der Entwicklung der Hydromechanik von Peltonturbinen bestimmte Grimsel Hydro erstmals rechnerisch die Durchgangsdrehzahl einer Peltonturbine bis auf 1% genau [11, 12]. Die Berechnung ist so einfach, dass sie mithilfe eines Taschenrechners innerhalb einer Minute aus den Kenndaten einer Peltonturbine (z.B. spezifische Drehzahl) gemacht werden kann. Die Rechenmethode basiert auf der genauen Betrachtung der Interaktion zwischen dem

Wasserstrahl und den rotierenden Schaufeln. Die Genauigkeit wurde bei den bisher bearbeiteten Peltonturbinen bestätigt. Ferner kann nun auch der genaue Beschleunigungsprozess bis zur Durchgangsdrehzahl berechnet werden, was für Auslegungs- und Betriebsingenieure von Bedeutung ist.

Modellversuche und 1:1-Prüfstand

Weil die Berechnungsgrundlagen der Hydromechanik von Peltonturbinen bis vor Kurzem kaum entwickelt worden sind, hat in der Vergangenheit die experimentelle Methode die Entwicklung dominiert. Dabei haben die traditionellen Modellversuche zur Verbesserung der Strömungsverhältnisse wesentlich beigetragen. Als ein Gegenbeispiel war die in Bild 6 gezeigte Fehlauslegung einer zweidüsigen Peltonturbine sicherlich ohne Modellversuch zustande gekommen. Weil die Technologie von Pelton-turbinen weit fortgeschritten ist und selbst kleine Verbesserungen der Strömungsverhältnisse durch Modellversuche kaum mehr zu erzielen sind, kommen diese fast ausschliesslich bei der Wirkungsgradkalibrierung zur Anwendung. Aber auch hier ist es nicht ganz ohne Probleme, wenn der Wirkungsgrad aus den Modellversuchen auf die Grossmaschine aufgewertet werden soll. Die in der IEC-Norm 60193 vor-

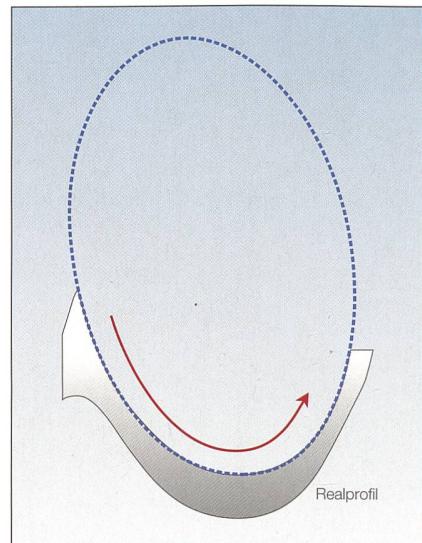


Bild 10 Die Ellipse gibt das Profil der Schaufel vor.

geschlagene Aufwertungsmethode ist zum Teil als unbegründet nachgewiesen worden [13]. Somit dürfte ein Modellversuch heute nur dann Sinn machen, wenn neue Aspekte zielgerichtet verifiziert werden sollen. Als zielgerichtet sind hier Messungen gemeint, die durch fortgeschrittene Hydromechanik von Peltonturbinen unterstützt sind.

Für Versuche an Grossausführungen ist bei Grimsel Hydro ein Prüfstand installiert worden (Bild 9). Dieser dient vor allem dazu, verschiedene Peltonräder hinsichtlich ihrer Hydraulik zu vergleichen sowie neue Aspekte in der Hydraulik zu verifizieren.

Auslegung des Schaufelprofils

Das hydraulische Profil auf der Innenseite der Peltonschaufeln muss so ausgelegt werden, dass sich das Wasser möglichst stetig und gerichtet ausbreitet. Das Profil soll in erster Linie keine Unstetigkeit aufweisen. Das wird nicht nur von der Hydraulik, sondern auch von der mechanischen Fertigung der Schaufeln, z.B. von Fräsmaschinen, verlangt. Am Schaufelausschnitt wird vom Profil oft verlangt, dass keine Strömungsablösung beim Wassereintritt in die Schaufel auftreten soll. Die vollkommene Stetigkeit des Schaufelprofils wird am besten erzielt, wenn das Profil in jedem Schaufelquerschnitt durch eine einzige mathematische Kurve beschrieben werden kann. Unter verschiedenen mathematischen Funktionen zeichnet sich das Ellipsenmodell als das am besten geeignete aus. Bei der Anwendung eines Ellipsenmodells ist nur noch zu bestimmen, wie die Ellipsenparameter festgelegt werden können und mit welchem Stück der Ellipse das Schaufelprofil angenähert werden soll. Bild 10 zeigt, wie ein ellipsenförmiges

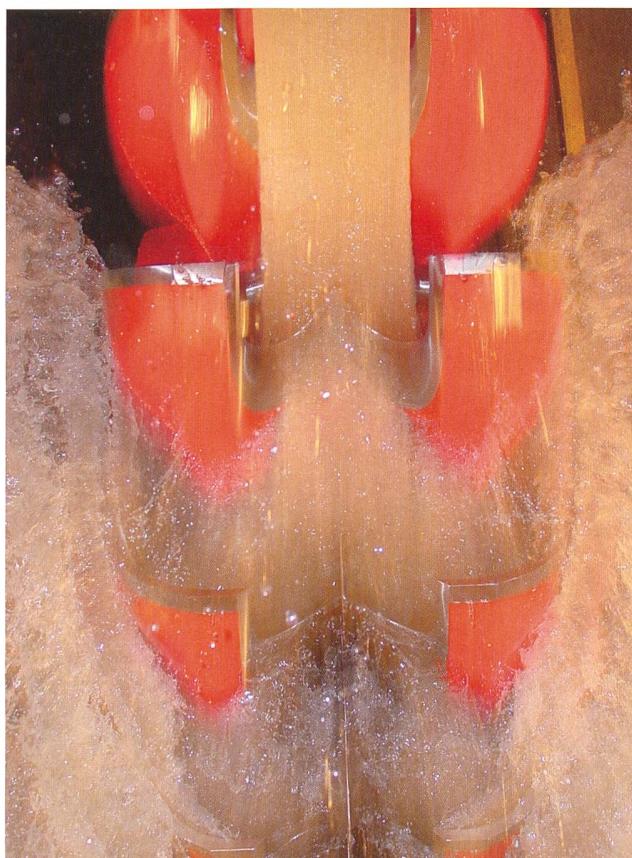


Bild 9 Eine Pelton-turbine im Prüfstand der KWO.

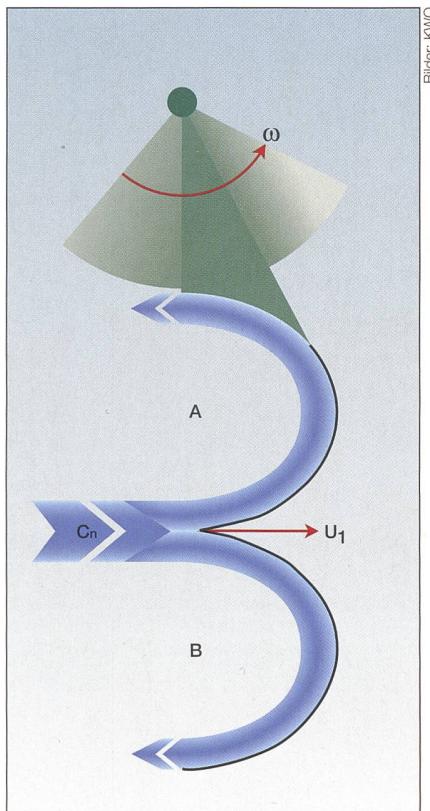


Bild 11 Der Energieaustausch beider Schalen ist identisch, auch wenn die Schalen unterschiedlich gross sind.

Schaufelprofil für vorgegebene Randbedingungen exakt berechnet werden kann.

Gedankenmodell

Im Zusammenhang mit der physikalischen Betrachtung der relativen Bewegung des Wassers in einer rotierenden Schaufel wurde ein Gedankenspiel nach Bild 11 vorgestellt. Es geht um die Frage, ob die Energieaustausche in beiden Schaufeln A und B gleich sind. Die Vorbedingungen dazu sind

- eine reibungsfreie zweidimensionale Wasserströmung in zweidimensionalen Schaufeln;
- eine Umfangsgeschwindigkeit an der Stelle des Eintritts $U_1 = 0,5 C$;
- die Schwerkraft wird vernachlässigt.

Die Berechnung nach [7, 8] zeigt, dass in beiden Schaufeln die gleichen Leistungsaustausche stattfinden – selbst wenn die beiden Schaufeln unterschiedlich gross sind.

Zusammenfassend lässt sich die Hydraulik von Pelonturbinen also mit vertretbarem Aufwand berechnen. Zudem ist zu erwarten, dass die verbreitete numerische Methode (CFD) durch die hier präsentierten Kenntnisse deutlich zuverlässiger wird.

Referenzen

- [1] Bundesamt für Energie (BFE): Ausbaupotenzial der Wasserkraft. Bern, 2004.
- [2] R. Chatelain: Zur heutigen Situation der Wasserkraftnutzung. Wasser-Energie-Luft. 90. Jahrgang, Heft 7/8, 1998.
- [3] Zh. Zhang, F. Muggli, E. Parkinson, C. Schärer: Experimental investigation of a low head jet flow at a model nozzle of a Pelton turbine. 11th Int. seminar on hydro power plants, Vienna, Austria, 2000.
- [4] Zh. Zhang, E. Parkinson: Strömungsuntersuchungen am Freistrahler der Pelonturbine und Anpassen des LDA-Verfahrens. 9. Gala-Tagung, Lasermethode in der Strömungsmesstechnik, Winterthur, 2001.
- [5] Zh. Zhang: Dual-Measurement-Method and its extension for accurately resolving the secondary flows in LDA applications. J. Flow Measurement and Instrumentation 16, 2005.
- [6] Zh. Zhang, M. Casey: Experimental studies of the jet of a Pelton turbine. Proc. IMechE Vol. 221, Part A: J. Power and Energy, 2007.
- [7] Zh. Zhang, J. Müller: On the flow interchanges between the jet and the bucket of Pelton turbines. Hydro 2005, Villach, Austria, 2005.
- [8] Zh. Zhang: Flow interactions in Pelton turbines and the hydraulic efficiency of the turbine system. Proc. IMechE, Vol. 221, Part A: J. Power and Energy, 2007.
- [9] Zh. Zhang, J. Müller: The effect of flow friction in the rotating bucket of Pelton turbine on the hydraulic efficiency. Hydro 2006, Porto Carras, Greece, 2006.

- [10] Zh. Zhang: Flow friction theorem of Pelton turbine hydraulics. Proc. IMechE, Vol. 221, Part A: J. Power and Energy, 2007.
- [11] Zh. Zhang, J. Müller: Efficiency and runaway characteristics of a Pelton turbine. Hydro 2007, Granada, Spain, 2007.
- [12] Zh. Zhang: Efficiency characteristic and runaway speed of a Pelton turbine. Proc. IMechE. J. Turbomachinery. Transactions of ASME, 2008.
- [13] Zh. Zhang: Improvement of scale-up method for efficiency conversion of Pelton turbines. 14th international seminar on hydropower plants, Vienna, Austria, 2006.

Angaben zum Autor

Dr. **Zhengji Zhang** ist seit 2004 bei Grimsel Hydro der Kraftwerke Oberhasli AG in Innertkirchen für die Entwicklung und Auslegung von Strömungsmaschinen tätig. Er ist zudem Autor des Buches «Freistrahlturbinen», das im Oktober 2008 im Springer-Verlag erscheint (Buchrezension auf Seite 56).
Grimsel Hydro, Kraftwerke Oberhasli AG,
3862 Innertkirchen, zha@kwo.ch

Résumé

Hydromécanique des turbines Pelton

Approche calculatoire en vue d'améliorer l'efficacité. Les turbines Pelton conviennent aux grandes hauteurs de chute et sont de ce fait très répandues en Suisse. Etant donné que tant l'eau que les pales de turbines se déplacent, le calcul hydromécanique est difficile; jusqu'à présent, les turbines sont dimensionnées de manière empirique par l'expérience. En ayant recours à des simplifications appropriées, par exemple en décomposant le jet d'eau en couches, on peut fort bien calculer l'hydromécanique. Ces calculs donnent des indications sur la manière d'améliorer encore l'efficacité.

EMCT Swiss-ConnTec SA

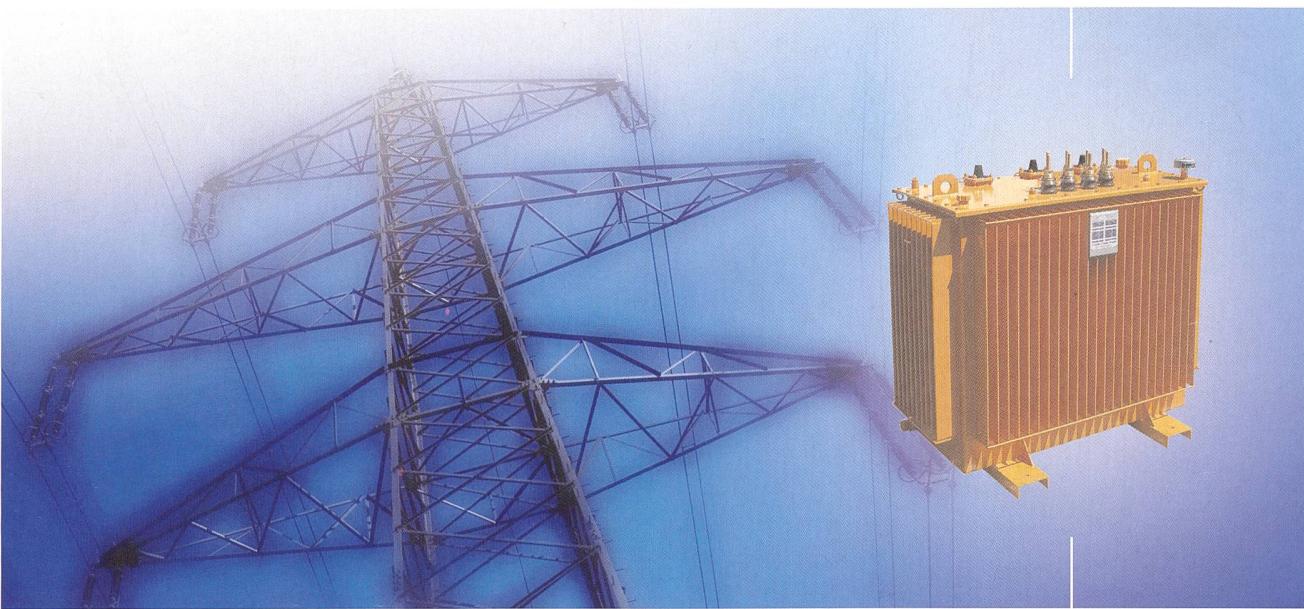
POSTFACH 241, GRUBENSTR. 7a
CH-3322 Urtenen-Schönbühl / Bern
E-MAIL: info@emct.ch

TELEFON + 41 (0)31 859 34 94
TELEFAX + 41 (0)31 859 20 17

Steckverbinder, MIL-C & Eigenfabrikation
Alarm / Schallgeber Steckverbinder Relais
Ringkerntransformatoren Kabel & Zubehör Elektromagnete

Piezo-Schallgeber Electronic-Summer
EMCT, Swiss made, high quality buzzers and
access to worldwide connector technology.

24 HRS. Information & Service W3.emct.ch



Die einfache Lösung für Ihr NISV-Problem
– wir reduzieren die Felder an der Quelle
auf ein Minimum.

**RAUSCHER
STOECKLIN**

Rauscher & Stoecklin AG
Reuslistrasse 32, CH-4450 Sissach
T +41 61 976 34 66, F +41 61 976 34 22
info@raustoc.ch, www.raustoc.ch

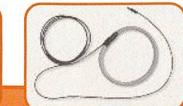
Die neuen NIN-NIV Installationstester für den Elektro-Fachmann

Combi Test 419 für alle NIN-NIV Messungen und
Combi Test 420 mit zusätzlich integrierter Netzanalyse
Alle Messungen werden nach den NIN - NIV Richtlinien durchgeführt.



Combi Test 419
CHF 1450,-
zzgl. MWST

Fernbedienung, Software, Strom- sowie
Leckstromzange, Luxmeter optional erhältlich

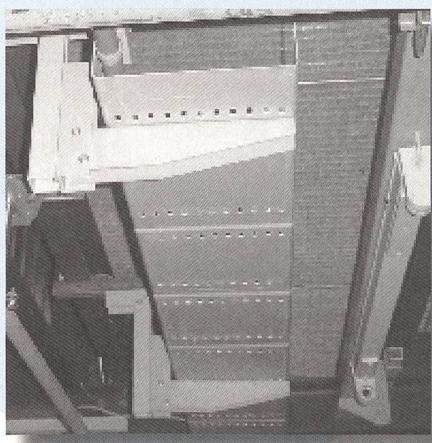


OPTEC GmbH
Grundstrasse 22 • CH-8344 Bäretswil
Telefon 044 979 10 02 • Fax 044 979 10 01
e-mail: info@optec.ch • Internet: www.optec.ch

OPTCC
Technik die zählt...

Das Beste, was Sie Kabeln unterlegen können

Zum Beispiel:
GFK-Kanal mit GFK-Träger



Kabelführungs-Systeme aus
GFK mit Langzeitnutzen.
Fragen Sie Ihren Grossisten
oder bei Ebo Systems.

Telefon 044 787 87 87
info.ch@ebo-systems.com

ebo
Ebo Systems