

Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria
Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband
Band: 101 (2009)
Heft: 3

Artikel: Die Auswirkung der Strahlqualität auf den Wirkungsgrad von Peltonturbinen
Autor: Staubli, Thomas / Abgottsporn, André / Weibel, Pascal
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-941939>

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: 12.02.2026

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

Die Auswirkung der Strahlqualität auf den Wirkungsgrad von Pelonturbinen

■ Thomas Staubli, André Abgottsporn, Pascal Weibel, Claude Bissel, Etienne Parkinson, Julien Leduc

Zusammenfassung

Mit Labormessungen, theoretischen Studien, Feldmessungen und numerischer Strömungsberechnung wurde die Qualität von Peltonstrahlen untersucht. Einflussfaktoren auf die Strahlqualität wurden erforscht, wie z.B. die Strahldispersion, welche mit der Aufweitung des Strahls mit wachsendem Abstand von der Düse definiert ist und welche das Luft-Wasser-Gemisch am Strahlrand beinhaltet, die Strahlablenkung, die Strahldeformation oder Unrundheit, die Ungleichförmigkeit der Geschwindigkeit im Strahl, die Rotation des Strahls, Sekundärströmung im Innern, Turbulenzgrad, Tropfenschlag auf die Strahloberfläche oder auch Luftblasen im Strahlinnern. Die Strahldispersion ist wesentlich von der Vorgeschichte der Strömung und der sich ausbildenden Sekundärströmung beeinflusst. Dies konnte mit einer systematisch durchgeführten Laborstudie nachgewiesen werden.

Thermodynamische Wirkungsgradmessung, Strahlvisualisierung und numerische Strömungsberechnung haben sich in ihrer Kombination als ausgezeichnetes Werkzeug für eine rasche und treffsichere Analyse der Situation in den untersuchten Kraftwerken erwiesen. Schwachstellen bei den Wirkungsgraden einzelner Düsen und deren Ursache wurden erkannt.

Mit den Strahlaufnahmen in den Kraftwerken konnte die Dispersion und die Ablenkung des Strahls quantitativ ausgewertet werden. Ein klarer Zusammenhang zwischen vergrösselter Strahldispersion und schlechterem Wirkungsgrad wurde nachgewiesen.

Résumé

La qualité des jets des turbines Pelton a été étudiée au moyen de mesures en laboratoire, d'études théoriques, de mesures sur des prototypes et de simulations numériques.

Les facteurs influant sur la qualité du jet ont été examinés: la dispersion du jet définie par l'élargissement du jet croissant avec l'éloignement à l'injecteur et par la densité du mélange eau-air en périphérie du jet; la déviation; la déformation ou l'excentricité du jet; la répartition non homogène du champ de vitesse; la rotation du jet; les écoulements secondaires; le degré de turbulence; les chocs de gouttes à la surface du jet ou encore des bulles d'air à l'intérieur du jet.

La dispersion du jet dépend principalement de l'historique de l'écoulement et des écoulements secondaires qui en résultent. Ce constat a pu être établi grâce à une étude systématique en laboratoire.

La combinaison des mesures thermodynamiques de rendement, des visualisations de jet et des simulations numériques s'est avérée être un excellent outil de diagnostic dans les centrales hydro-électriques analysées.

Les déficits de rendement de certains injecteurs ont été mesurés et leurs causes identifiées.

Les prises de vue des jets en centrales ont permis une caractérisation quantitative de la dispersion et de la déviation du jet. Une corrélation claire entre dispersion du jet et rendements a été établie.

1. Die Bedeutung der Pelton-turbine für die Schweiz

In der Schweiz gibt es 107 Wasserkraftanlagen, in denen Pelonturbinen mit Leistungen über 5 MW installiert sind. Insgesamt zählt man in diesen Anlagen 196 Pelonturbinen. Die meisten dieser Hochdruckanlagen verfügen über beträchtliches Speichervolumen. Etwa 70% des in der Schweiz von Speicherwerkten produzierten Stroms wird mit Pelonturbinen erzeugt. Wegen ihrer kurzen Anlasszeit, ihrer effizienten Teillastcharakteristik und der Einbindung in Speicheranlagen können Pelonturbinen bestens zur Spitzenlastproduktion eingesetzt werden. Sie decken einen wichtigen Anteil an Regelenergie in der Schweiz ab und stabilisieren so

unser Stromnetz. Die Lieferung von Spitzenergie in das europäische Verbundnetz bietet darüber hinaus eine lukrative Marktchance.

Installiert ist eine Gesamtleistung der schweizerischen Pelonturbinen von über 7.3 GW. Dies ist etwas mehr als die Hälfte der Gesamtleistung von Wasserturbinen. Pelonturbinen haben auch einen wesentlichen Anteil an der gesamten schweizerischen Stromproduktion. Ihr Anteil beträgt 22% der gesamten Stromproduktion und etwa 40% der hydroelektrischen Produktion.

Auch wenn der Pioniergeist in der Schweiz mit dem Bau der weltstärksten Pelonturbinen in Biedron mit 3x420 MW vor 15 Jahren nochmals aufgeflammmt ist,

so ist die grosse Zeit des Baus von neuen Anlagen mit Pelonturbinen vorbei. Von den 107 oben erwähnten Anlagen wurden bereits 92 vor 1970 gebaut. In vielen der älteren Anlagen wurden wesentliche Erneuerungsarbeiten vorgenommen. Um die Investitionskosten bei solchen Erneuerungen in Grenzen zu halten, werden meist nur die Turbinensteuerung und das Laufrad ersetzt. Im Allgemeinen werden das Turbinengehäuse und die Einläufe nicht ersetzt. Dies bedeutet, dass in den meisten Peltonanlagen der Schweiz eine alte Technologie bei der Erzeugung der Wasserstrahlen eingesetzt wird.

Interessant ist, dass erst 1972, also nach der Fertigstellung der meisten Anlagen, eine erste wissenschaftliche Arbeit



zur Qualität von Peltonstrahlen publiziert wurde. Villacorta [1] verfasste damals seine Doktorarbeit mit dem Titel «Theoretische und experimentelle Untersuchungen an Einlaufdüsen von Freistrahlturbinen». Seine noch heute sehr wertvollen Erkenntnisse konnten also leider gar nicht beim Bau der allermeisten Peltonanlagen der Schweiz einfließen.

Es stellt sich also nun die Frage nach dem Verbesserungspotenzial. Um dieser Fragestellung nachzugehen, wurde an der Hochschule Luzern und der Ecole Centrale de Lyon in Zusammenarbeit mit Andritz Hydro ein Projekt zur Untersuchung der Qualitätskriterien von Peltonstrahlen lanciert. Mittfinanziert wurde das Projekt von «swisselectric research».

Fallstudien [Staubli et al. 2, 3, 4 und Peron et al. 5], welche bereits vor der Initiierung dieses Projektes durchgeführt wurden, haben starke Indizien geliefert, dass bei einer grösseren Zahl von Peltonanlagen Wirkungsgradverbesserungen im Bereich von 0.5 bis 1% bei Verbesserung der Strahlqualität möglich sein sollten.

Der heutige Stand der Technik bei Erneuerungen von Peltonanlagen berücksichtigt bereits das Wissen um die Strahlqualität, wie dies von Parkinson et al. [6] beschrieben wird.

2. Peltoneinlauf und Kriterien für optimale Strahlqualität

Der Peltoneinlauf stellt eine Hauptkomponente der Peltonturbinen dar. Im Düsenbereich wird die Druckenergie gänzlich

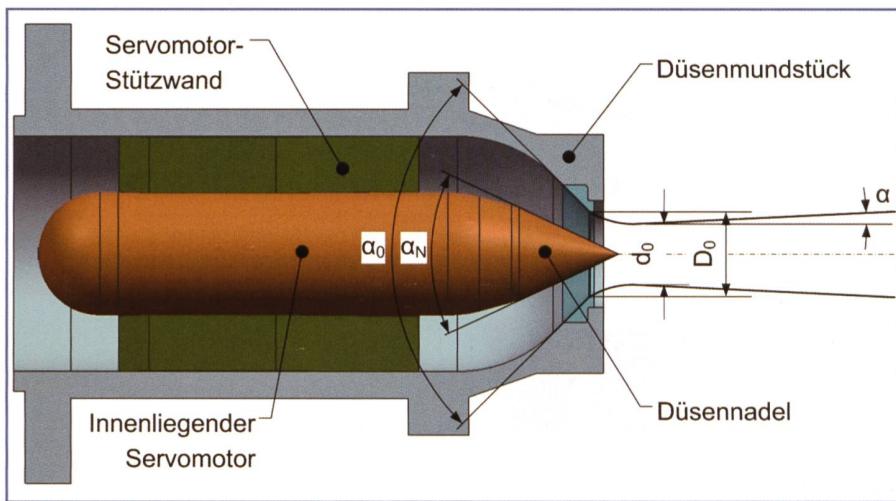


Bild 1. Komponenten des Einlaufs von Peltonturbinen.

in kinetische Energie gewandelt. Mit der Düsenneedle wird der Durchfluss und somit die Leistung der Turbine geregelt. Die wesentlichen Komponenten eines Peltoneinlaufs sind Düsenmundstück, Düsenneedle und Servomotor. Dieser kann innenliegend (siehe Bild 1) oder aussenliegend sein. Zirca $\frac{2}{3}$ der Schweizer Peltonkraftwerke im Leistungsbereich >5 MW haben eine Bauart mit innenliegendem Servomotor.

Die Formgebung des Einlaufs, insbesondere die Düsen- (α_0) und Nadelwinkel (α_N), haben einen grossen Einfluss auf die Strahlqualität. Heute baut man Einläufe mit Düsenwinkeln von 85–90° und Nadelwinkeln von 50°.

Die theoretische Strahlgeschwindigkeit ist eine Funktion der Fallhöhe und kann wie folgt berechnet werden.

$$c_{Strahl} = \sqrt{2 \cdot g \cdot H}$$

Der theoretische Strahldurchmesser berechnet sich aus dem Durchfluss und der theoretischen Strahlgeschwindigkeit.

$$A_0 = \frac{Q}{c_{Strahl}} \rightarrow d_0 = \sqrt{\frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H}}}$$

Ein idealer Peltonstrahl weist eine konstante Geschwindigkeit über den Strahlquerschnitt auf, und sein Durchmesserweitert sich mit zunehmendem Abstand von der Düse nicht auf. Bei einer realen Strömung hingegen bewirkt die Grenzschicht am Servomotorkörper und an der Düsenneedle eine Geschwindigkeitsminderung, und es werden deshalb im Zentrum des Strahls tiefere Geschwindigkeiten (Villacorta [1] und Zhang [7]) gemessen. Der Rand des Strahles wird durch die Grenzschicht am Aussenrohr und des Düsenmundstücks beeinflusst, auch wenn diese durch die starke Beschleunigung der Strömung in der Düse sehr dünn ist. Die Oberflächenspannung hat die Tendenz, den Strahl zusammenzuhalten, aber wegen der hohen Geschwindigkeiten kommt es in der Scherschicht zur Luft zu Instabilitäten, und mit zunehmendem Abstand vom Mundstück wird der Strahlrand von Tropfen gebildet. Es kommt zu einem Gemisch aus Umgebungsluft und Wasser. Visuell beobachtet man eine Strahlauweitung, welche im Folgenden wegen der Zweiphasenströmung in der Scherschicht als Dispersion bezeichnet wird.

Weiter wird die Strahlqualität charakterisiert durch klein- und grossmassstäbliche Deformationen der Strahloberfläche, durch Ablenkung oder Rotation des Strahls und durch zeitliche Schwankungen des Strahls. All diese Vorgänge werden

JISPP-Projekt

Das in den Jahren 2006–2009 abgewickelte Projekt «Jet Improvement for Swiss Pelton Plants» (JISPP) hatte zum Ziel, die Strahlqualität typischer Peltonanlagen der Schweiz zu untersuchen und das Verbesserungspotenzial aufzuzeigen. Dieses Projekt wurde auf 4 Ebenen parallel abgewickelt. Neben theoretischen Studien wurden systematische Untersuchungen im Labor durchgeführt, in Feldmessungen wurde der Strahl visualisiert und Wirkungsgradmessungen durchgeführt, und schliesslich wurden für alle untersuchten Anlagen auch numerische Strömungsberechnungen durchgeführt, um den Einfluss der Zuströmung zur Düse auf die Strahlqualität verstehen zu können. Das Projekt wurde an der Hochschule Luzern und der Ecole Centrale de Lyon in Zusammenarbeit mit Andritz Hydro abgewickelt. Mitfinanziert wurde das Projekt von «swisselectric research».

Le projet JISPP

Le projet JISPP (Jet Improvement for Swiss Pelton Plants), qui s'est déroulé entre 2006 et 2009, a eu pour but d'analyser la qualité de jet de centrales Pelton représentatives des turbines Pelton suisses et d'en montrer le potentiel d'amélioration. Afin de comprendre l'influence des écoulements en amont du jet sur la qualité de celui-ci, le projet combine quatre approches: la modélisation analytique, des mesures en laboratoire, des campagnes d'essais en centrales où les jets sont visualisés en parallèle à des mesures de rendement et les simulations numériques.

Les acteurs du projet ont été la «Hochschule Luzern», l'Ecole Centrale de Lyon en partenariat avec Andritz Hydro. Le projet a été cofinancé par «swisselectric research».

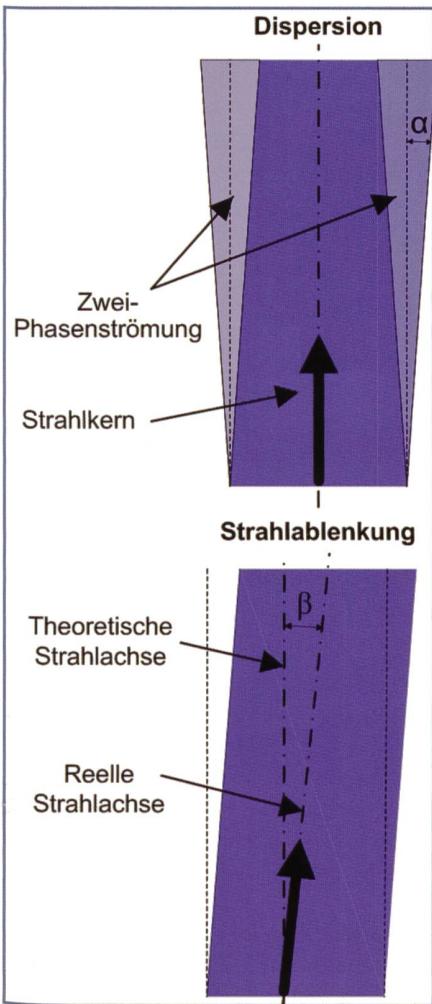


Bild 2. Definition der Dispersion und der Strahlablenkung.

wesentlich durch die Vorgeschichte der Strömung geprägt. Einerseits ist es der Turbulenzgrad der Strömung vor dem Einlauf, der sich wie ein Fingerabdruck auf der Strahloberfläche widerspiegelt, und andererseits ist es die Sekundärströmung mit ihren Querkomponenten zur Hauptströmung aufgrund von Krümmern, Abzweigern und anderen die Strömung beeinflussenden Elementen, welche sich negativ auf die Strahlqualität auswirken.

2.1 Dispersion und Strahlablenkung

In Bild 2 ist die Dispersion und die Strahlablenkung definiert. Der Winkel α bezeichnet den halben Aufweitungswinkel des Stahles und wird mit dem visuell beobachtbaren äusseren Rand des Strahles bestimmt. Die Dispersion des Strahles führt zu einer geringeren Energiedichte und damit zu Verlusten bei der Energieumsetzung im Peltonbecher.

Die Strahlablenkung der reellen Strahlachse zur theoretischen Strahlachse wird durch den Winkel β definiert. Durch die Ablenkung des Strahles trifft der Strahl nicht im ausgelegten Bereich im Pelton-

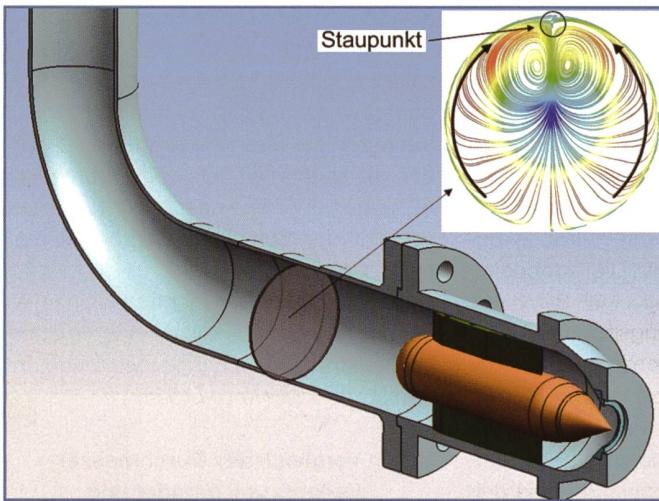
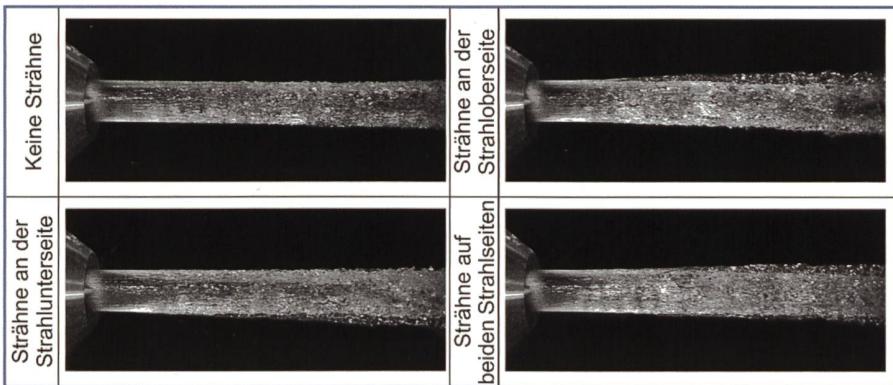


Bild 3, (links).
Sekundärströmung aufgrund eines 90°-Krümmers in der Zuleitung.



becher auf. Visuell wird die Strahlablenkung in der Beobachtungsebene durch die Strahlränder bestimmt. In der numerischen Strömungsberechnung kann er räumlich durch den Verlauf des Schwerpunktes bestimmt werden.

Neben Verlusten kann eine Strahlablenkung auch zu unerwünschten lokalen Erosionen im Bechergrund, an der Schneide oder in der Rückenpartie des Becherausschnittes führen. Bei sehr starker Ablenkung kann geschehen, dass ein Teil des Strahles nicht auf den Peltonbecher auftrifft und ungebremst auf das Gehäuse oder einen nachfolgenden Einlauf auftrifft [2].

In Kraftwerken mit mehrdüsigen Peltonturbinen sind Krümmern stromaufwärts der Düsen unvermeidbar. Diese Krümmern führen aufgrund des Impuls austausches zu einer Sekundärströmung, wie im Bild 3 mit einer 90°-Krümmerzuleitung in einem Laboraufbau gezeigt wird.

Das Bild 4 mit Fotoaufnahmen aus dem Labor zeigt die Auswirkung der vom Krümmer induzierten Sekundärströmung auf den Strahl. Einerseits wird der Strahl global von der theoretischen Strahlachse abgelenkt und andererseits wird der Strahl deformiert. Diese Deformation kann man mit dem Staupunkt der Sekundärströmung erklären, welcher zu einem

Wulst oder Strähne auf dem Strahl führt. Diese in der Krümmerebene zu beobachtende Strähne ist auf den Fotos am oberen Strahlrand zu sehen. Um die zeitlichen Veränderungen des Strahls zu zeigen, sind im Bild 4 vier Aufnahmen zu unterschiedlichen Zeitpunkten gezeigt. Man erkennt, dass die Strähne am oberen Rand starken Schwankungen ausgesetzt ist und auch am unteren Strahlrand ausgeprägte zeitliche Veränderungen beobachtet werden.

3. Labormessungen

Um Einflussparameter quantitativ zu untersuchen, wurden im Labor der Hochschule Luzern an einem homologen Einlauf, wie er für Modellversuche von Pelton turbinen typischerweise eingesetzt wird, Messungen durchgeführt. Bei den Versuchen wurden einerseits die Versuchsbedingungen wie Druck und Düsenöffnung variiert und andererseits die Zuströmbedingungen zum Einlauf durch eine Reihe von Elementen beeinflusst.

Neben dem Volumenstrom wurden beim Einlauf der statische Druck, Druckschwankungen, Beschleunigungen (Vibrationsmessungen) und die Druckverteilung am Mundstück gemessen.

Für die Untersuchung der Strahlqualität hat sich vor allem die Visualisierung als geeignetes Messwerkzeug erwie-

sen. Die heutigen Technologien, die hohen Abtastraten der Kamera und automatisierte Bildverarbeitung, ermöglichen eine quantitative Analyse des Strahles.

Die Visualisierung des Strahles erfolgte mit zwei verschiedenen Kameratypen. Für Momentaufnahmen wurde eine CCD-Flächenkamera mit Stroboskopbeleuchtung eingesetzt. Die stroboskopische Beleuchtung mit einer Blitzdauer von $6\text{--}10 \mu\text{s}$ wurde eingesetzt, um die Bewegungsunschärfe des Strahles bei Momentaufnahmen zu minimieren.

Echtzeitaufnahmen erfolgten mit einer Zeilenkamera, die eine Konstantlichtquelle mit hoher Lichtstärke erfordert (siehe Bild 5). Dazu wurden zwei Halogenlampen mit je 1000 W eingesetzt.

Um die aufgenommenen Bilder quantitativ auswerten zu können, wurden jeweils zur Kalibration Aufnahmen mit einem genau vermessenen Dummy-Strahl aus weißem Kunststoff gemacht.

Die Kameras und Lichtquellen sind auf einem fahrbaren Schlitten montiert. Dieser kann in Strahlrichtung verschoben werden und erlaubt eine Visualisierung des Strahles bei verschiedenen Abständen zur Düse. Zusätzlich kann die Visualisierungsvorrichtung in Umfangsrichtung 360° um den Strahl gedreht werden. Dadurch ist eine Visualisierung des Strahles von allen Seiten möglich, und die Deformation und Dispersion des Strahls kann am ganzen Umfang quantitativ erfasst werden.

Zur Bestimmung des Strahldurchmessers wurden jeweils 200 000 Aufnahmen der Zeilenkamera ausgewertet. Durch Ableitung der Graustufenverteilung konnte

eine sehr präzise Kantenerkennung vorgenommen werden. Ausgewertet wurden der zeitliche Mittelwert der Kanten, die Standardabweichung und weitere statistische Kenngrößen. Ebenfalls ausgewertet wurden die spektralen Leistungsdichten, um Aussagen über das energetische Gleichgewicht der Schwankungsgrößen machen zu können.

Aufgrund der Lichtreflexionen an der Strahloberfläche konnte eine die Oberflächenstrukturen charakterisierende Intermittenz bestimmt werden.

3.1 Vergleich des Durchmesserverlaufs von gerader und 90° gekrümmter Zuleitung

In Bild 6 sind die zeitlich gemittelten, dimensionslosen Durchmesserverläufe bei gerader und gekrümmter Zuleitung gezeigt. Der Durchmesserverlauf in der X-Z-Ebene (blaue Symbole) ist bei beiden Zulaufkonfigurationen nahezu identisch. Der Krümmer hat also rechtwinklig zur Krümmerebene keinen Einfluss auf den Durchmesserverlauf des Strahles. In der Krümmerebene (Y-Z-Ebene = rote Symbole) ist der Einfluss jedoch markant. Die Sekundärströmung beeinflusst den Strahlerlauf, wie es bereits mit den Strähnenbildern in Bild 4 gezeigt wurde. Bereits bei kleinem Abstand von der Düse bewirkt die Krümmerebene eine größere Strahldispersion als die gerade Zuleitung. Der Aufweitungswinkel α bei größerem Abstand von der Düse beträgt beim 90° -Krümmer 1.7° , bei der geraden Zuleitung jedoch nur 1.1° . Anhand der Durchmesserverläufe der geraden Zuleitung erkennt

man, dass die größere Strahlaufweitung in Y-Z-Ebene nicht nur der Sekundärströmung des Krümmers zuzuordnen ist. Die Stützwände des innenliegenden Servomotors haben ebenfalls einen Einfluss auf den Strahldurchmesser und führen zu einer größeren Strahlaufweitung in der Y-Z-Ebene.

Neben dem Krümmer wurden weiter auch zylindrische Stäbe verschiedener Durchmesser als Störelemente eingesetzt, ebenso wie turbulenzerzeugende Gitter. In einer weiteren Versuchreihe wurden Luftblasen in die Zuströmung injiziert und deren Wirkung auf die Strahldispersion angeschaut.

4. Kraftwerksmessungen

Im Rahmen des Projektes konnten in einer Reihe von Anlagen thermodynamische Wirkungsgradmessungen und Strahlvisualisierungen durchgeführt werden (Tabelle 2). Aus den Strahlbildern konnte in den meisten Fällen die Strahldispersion und die Ablenkung quantitativ bestimmt werden. Der Vergleich der Wirkungsgrade und der Dispersion hat einen eindeutigen Zusammenhang aufgezeigt.

4.1 Kamerasuren

Für die Strahlvisualisierung in Kraftwerken wurde eine robuste und wasserdichte Konstruktion eingesetzt. Bild 7 zeigt den Kamerasuren als CAD-Modell und im eingebauten Zustand im Kraftwerk Soazza der Misoxer Kraftwerke AG. Der Support (grün) wird am Düsenhut befestigt. Auf dem Support ist eine Linearverstellung (orange) mit Schlitten (gelb) angebracht. Dieser Verstellmechanismus erlaubt eine Verschiebung des Kameragehäuses (blau) in Strahlrichtung und ermöglicht so eine Strahlvisualisierung vom Düsenaustritt bis zum Strahleingriff in den Peltonbecher. Im Kameragehäuse sind zwei Flächenkame-

	Flächenkamera	Zeilenkamera
Auflösung [pixel]	1024x768	1024x1
Abtastrate [Bilder pro Sekunde]	33	68'000
Kamerahersteller, Typ	uEye, 2230-M/C	Dalsa, Spyder3 GigE

Tabelle 1. Technische Daten der Kameras.

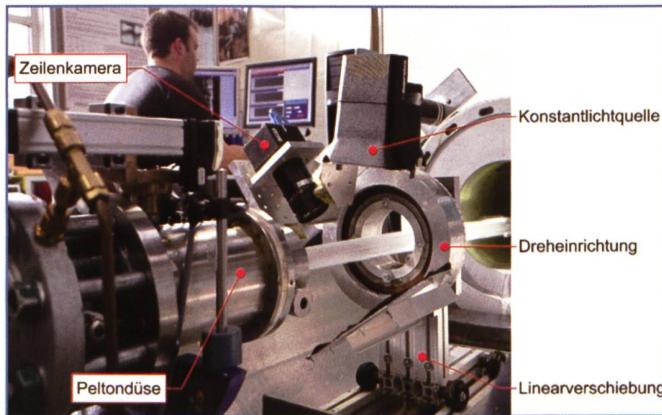


Bild 5. Laborprüfstand mit montierter Zeilenkamera und Konstantlichtquelle.

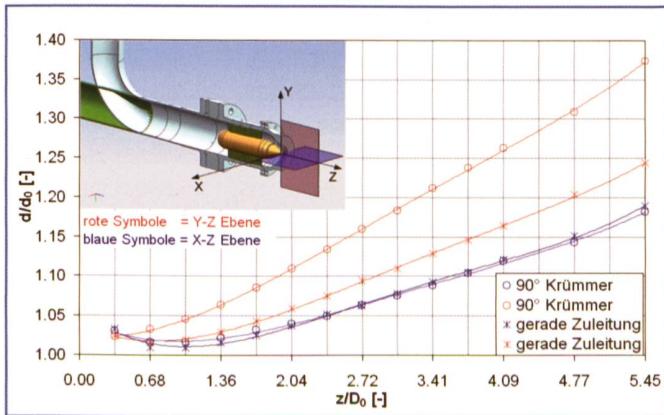


Bild 6. Mit dem Düsenmundstückdurchmesser D_0 dimensionslos gemachter Durchmesserverlauf bei gerader (Kreuze) und 90° gekrümmter (Kreise) Zuleitung.

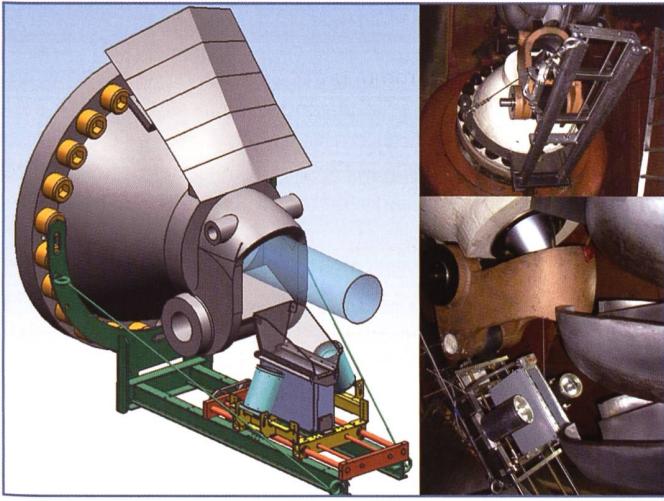


Bild 7. Kamerasupport.

Kraftwerk	Typ	Leistung	Durchfluss	Fallhöhe	Theoretischer Strahldurchmesser bei Nennfallhöhe und Vollast
		[MW]	[m³/s]	[m]	[mm]
Sedrun	Zwillingssturbinen, horizontal, 2-düsig	51.6	10.1	588	182
Rabiusa-Realta	horizontal, 2-düsig	13	3	498	147
Soazza	horizontal, 2-düsig	42.6	7	694	208

Tabelle 2. Untersuchte Peltonkraftwerke.

ras sowie eine Zeilenkamera installiert. Seitlich des Kameragehäuses sind Stroboskope (türkis) zur Strahlbeleuchtung angebracht. Aufgrund des Spritzwassers im Gehäuse der Turbine ist um das Kameragehäuse herum ein Schutzschild aus Plexiglas montiert. Zusätzlich wird die Glasscheibe des Kameragehäuses mit Druckluft vom auftreffenden Spritzwasser gereinigt.

4.2 Thermodynamische Wirkungsgradmessungen

Die Strömungsverluste in einer Pelonturbine verursachen über Dissipation einen Temperaturanstieg des Wassers. Eine Energie von ca. 4188 Joule wird benötigt, um 1 kg Wasser um 1 °C zu erwärmen. Bei einer Turbine bedeutet dies, dass bei einer Nutzfallhöhe von 427 m und einem Wirkungsgrad von 90% das Fluid aufgrund der hydraulischen Verluste um ca. 0.1 °C erwärmt wird.

Das Vorgehen zur Durchführung von thermodynamischen Wirkungsgradmessungen ist in der IEC-Norm (International Electrotechnical Commission) 60041 «Field acceptance tests to determine the hydraulic performance of hydraulic turbines, storage pumps and pump-turbines» detailliert beschrieben.

Um auch Effekte untersuchen zu können, welche nur wenige Promille im Wirkungsgrad ausmachen, wurde für das vorliegende Projekt die Messeinrichtung für die thermodynamische Wirkungsgrad-

messung unter Nutzung früherer Erfahrungen neu konzipiert. Als Temperatursensoren wurden die sich als äußerst stabil bekannten Seabird-Sensoren mit interner Signaldigitalisierung eingesetzt. Die mit dieser Einrichtung erreichte Wiederholbarkeit der Messpunkte war in allen Fällen besser als 0.2%, wie von Staubli und Abgottsporn [8] beschrieben.

4.3 KW Sedrun

Das Bild 8 zeigt das Ergebnis der thermodynamischen Wirkungsgradmessungen im Kraftwerk Sedrun der KW Vorderrhein AG, referenziert auf die jeweiligen Maxima. Die blaue Kurve zeigt den Wirkungsgradverlauf für den 2-düsigen Betrieb, während die roten und grünen Punkte Messungen mit jeweils nur einer Düse in Betrieb darstellen. Die Nadelstellung beim 1-düsigen Betrieb entspricht dabei der Öffnung, welche im 2-düsigen Betrieb bei einer relativen Leistung von 0.9 liegt. Es sind also die Wirkungsgrade, welche 1-düsig bei 0.45 relativer Turbinenleistung gemessen wurden, zu vergleichen mit der 2-düsigen Messung bei 0.9. Während die Werte des unteren Einlaufs nahezu die Werte des 2-düsigen Betriebs erreichen, liegen die Werte des oberen Einlaufs deutlich tiefer. Die Differenz der Wirkungsgrade der beiden Einläufe beträgt 0.5%.

In Bild 9 sind die Resultate der

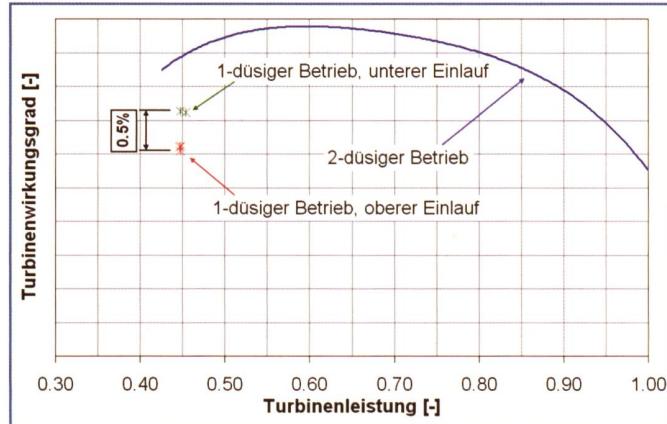


Bild 8. Kraftwerk Sedrun, Turbinenwirkungsgrad.

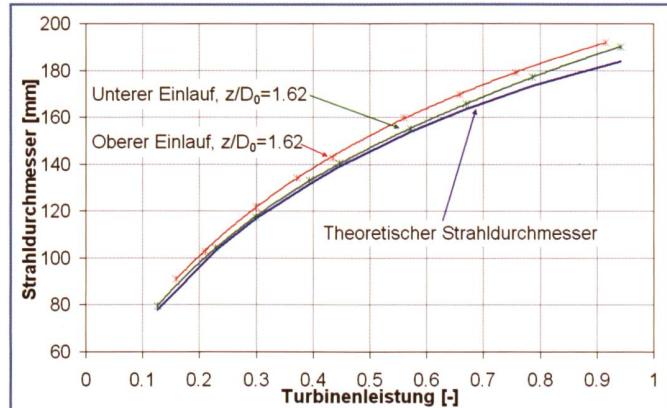


Bild 9. Kraftwerk Sedrun, Strahldurchmesserbestimmung.

Strahldurchmesserbestimmung im KW Sedrun dargestellt. Die blaue Kurve zeigt den theoretischen, mit der im ersten Abschnitt gegebenen Formel berechneten theoretischen Strahldurchmesser. Der klar erkennbare Durchmesserunterschied zwischen dem oberen und unteren Strahl erklärt, wieso beim oberen Einlauf ein schlechterer Wirkungsgrad resultiert. Der obere Einlauf in Sedrun weist eine stärkere Krümmung im Vergleich zur unteren auf, was zu einer verstärkten Sekundärströmung führt. Dies könnte ein Grund für die verstärkte Dispersion sein, obwohl in der Anlage nicht in der Krümmungsebene gemessen werden konnte, wo gemäß der Labormessung eine noch größere Dispersion zu erwarten wäre.

Typische Strahlbilder, wie sie in Sedrun aufgenommen wurden, sind in Bild 10 zusammengestellt. Dargestellt sind Bilder bei drei Betriebspunkten kurz nach Düsenaustritt (links) und im Bereich des Becher-eingriffs (rechts).

4.4 KW Rabiusa-Realta

Die Anordnung der Zuleitungen zu den beiden Einläufen der horizontalachsigen Maschinen im KW Rabiusa-Realta der KW Zervreila AG ist eher ungewöhnlich. Jede der Zuleitungen ist mit einem eigenen Ku-

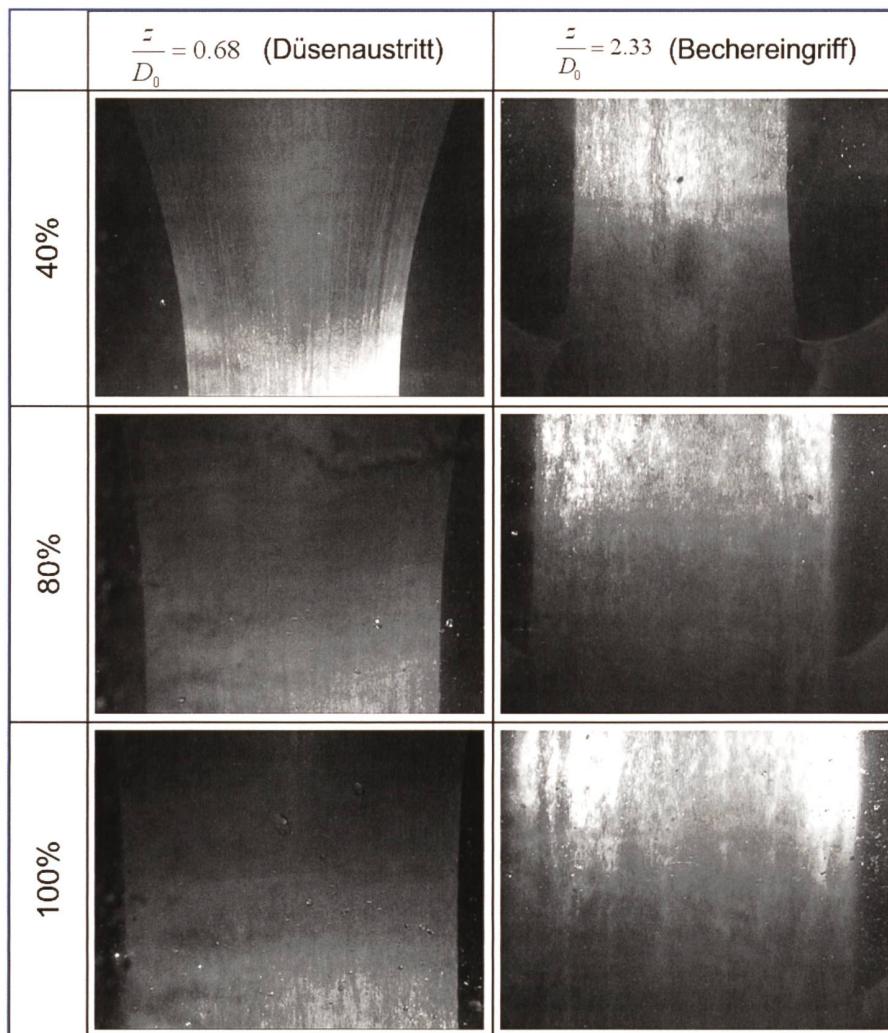


Bild 10. Strahlaufnahmen am unteren Einlauf bei verschiedenen Betriebspunkten und Düsenabständen.

gelschieber ausgerüstet. Die Zuströmung zum unteren Einlauf wird durch diese Anordnung zweimal in Krümmern umgelenkt, welche nicht in einer Ebene liegen. Besonders ist auch der kleine Winkel von 45° zwischen den beiden Einläufen. Bei solch kleinen Winkeln ist eine Interferenz zwischen den Strahleingriffen in die Becher zu erwarten.

Der Wirkungsgradunterschied zwischen dem oberen und unteren Einlauf bei 1-düsigem Betrieb von 1.5% ist enorm, Bild 12. Der Wirkungsgrad im Betrieb mit nur der unteren Düse ist sogar besser als beim 2-düsigen Betrieb bei gleicher Düsenöffnung. Dies kann wahrscheinlich mit der Interferenz der Strahleingriffe erklärt werden, welche beim 1-düsigen Betrieb nicht auftritt.

Auch im KW Rabiusa-Realta geht der schlechtere Wirkungsgrad des oberen Einlaufs einher mit einer grösseren Strahldispersion, welche aus den Strahlbildern ausgewertet werden konnte. Der untere Strahl weist eine wesentlich kleinere Auf-

weitung als der obere auf.

Der Doppelkrümmer des unteren Einlaufs und die dadurch induzierte Sekundärströmung bewirken zudem eine starke Ablenkung des Strahls. Dies erkennt man in Bild 13, wo die Mittelschneide des Bechers beim Eingriff in den Strahl sichtbar ist. Das Verhältnis der Distanzen a/b beträgt 1.18.

Die durch die Krümmer induzierte Sekundärströmung wurde eingehend mittels numerischer Strömungsberechnung untersucht. Eingesetzt wurde hierzu das kommerzielle Programm Ansys CFX unter Anwendung des SST-Modells (Shear stress transport model). Die Simulationen wurden im Modellmaßstab durchgeführt, das heisst, bei deutlich kleineren Reynolds-Zahlen als in der Anlage. Die resultierende Sekundärströmung ist in Bild 14 in den Vergrösserungen des austretenden Strahls dargestellt. Gezeigt sind die in die Strahlebene projizierten Geschwindigkeitsvektoren. Die Einfärbung gibt den Betrag der projizierten Geschwindigkeiten

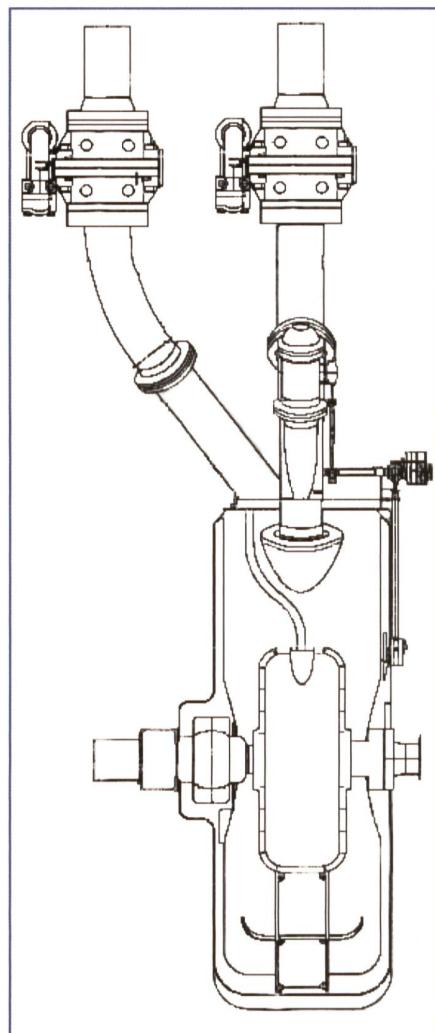


Bild 11. Draufsicht auf die horizontalachsigen Peltonturbinen im KW Rabiusa-Realta.

wieder. Durch die mehrfache Störung der Strömung wird die Geschwindigkeitsverteilung entsprechend komplex. Die Maximalbeträge der projizierten Geschwindigkeit erreichen circa 3% der Strahlgeschwindigkeit. Die Strahlverformung selbst wurde auch simuliert, wozu die Reynoldsgleichungen mit einem homogenen Multi-Phasen-Modell (Wasser-Luft) angenähert wurden.

4.5 KW Soazza

Auch im Kraftwerk Soazza konnten sowohl thermodynamische Wirkungsgradmessungen als auch Strahlvisualisierungen durchgeführt werden. Das Spezielle an dieser Studie war, dass sowohl vor als auch nach der Revision gemessen werden konnte und zusätzlich auch die Ergebnisse eines voll homologen Modellversuch in den Labors von Andritz Hydro in Vevey in die Analyse der Vorgänge einbezogen werden konnten.

Die Wirkungsgradmessungen vor der Revision zeigten wiederum einen we-

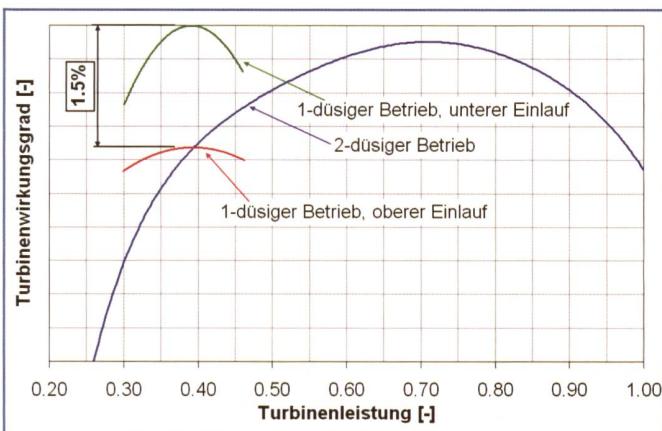


Bild 12. Kraftwerk Rabiusa-Realta, Turbinenwirkungsgrad.

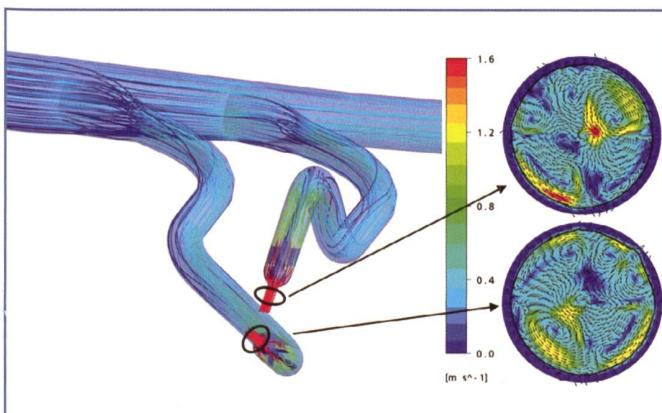


Bild 14. Kraftwerk Rabiusa-Realta, CFD-Simulation der Sekundärströmung im Strahl.

sentlichen Unterschied zwischen dem oberen und unteren Einlauf. Diesmal war der obere Einlauf um 0.8% schlechter. Nach den Erneuerungsarbeiten stieg das globale Wirkungsgradniveau um 2.5% und der Unterschied zwischen oberem und unterem Einlauf bei 1-düsigem Betrieb verschwand fast gänzlich.

Die Visualisierung vor der Revision zeigte beim oberen Einlauf viel Spritzwasser, das von oben auf den Strahl auftrat. Bestätigt wurde dies auch in den Modellversuchen. Durch Verbesserungen bei den Einbauten im Gehäuse – zuerst beim Modell und dann beim Prototypen – konnte dieses Wasser vom Strahl weggelenkt werden, was sich eindeutig in den Aufnahmen im KW Soazza nach der Revision gezeigt hat. Entsprechend hat die Strahldispersion nach den Umbauten abgenommen und, wie beim Wirkungsgrad, konnte zwischen dem oberen und dem unteren Strahl kein Unterschied mehr festgestellt werden.

4.6 Offene Fragen

Neben den im Projekt geklärten Fragen haben sich auch viele neue Fragestellungen ergeben. Der Analyse bisher noch nicht zugänglich waren alle Phänomene in

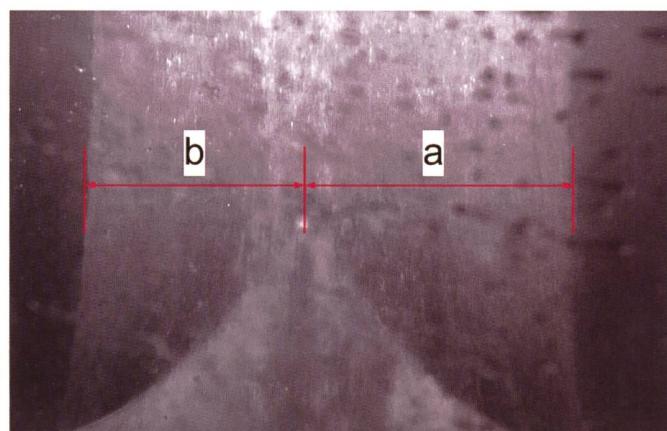


Bild 13. Strahlablenkung im Kraftwerk Rabiusa-Realta.

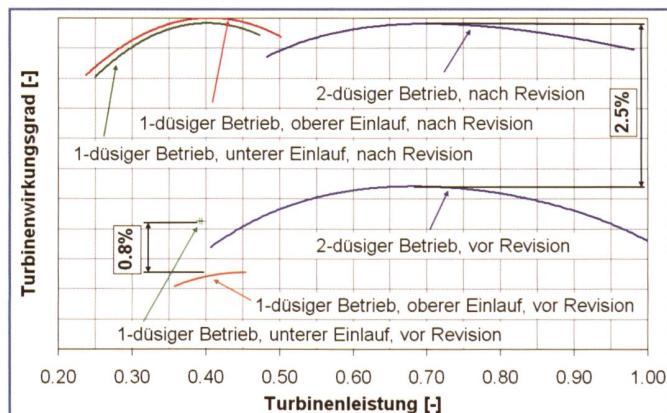


Bild 15. Kraftwerk Soazza, Turbinenwirkungsgrad vor und nach der Revision.

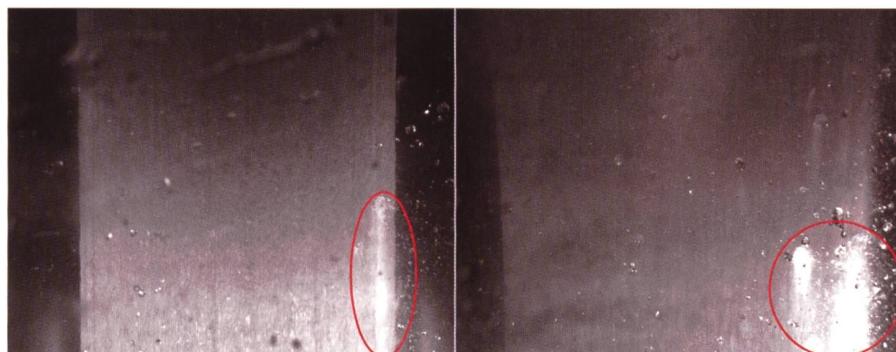


Bild 16. Luftexplosionen oder Tropfenaufschlag auf dem Strahl. Links: Kraftwerk Rabiusa-Realta, Rechts: Kraftwerk Sedrun.

Zusammenhang mit den zeitlichen Strahlschwankungen, welche sowohl bei den Prototypen als auch beim Modellstrahl beobachtet wurden.

Aus den gemessenen spektralen Leistungsdichten der Strahlrandvermessung am Modell konnte festgestellt werden, dass im Strahl eine Produktion von turbulenten kinetischer Energie stattfindet, welche grösser als deren Dissipation ist. Wie diese Produktion stattfindet, wurde bisher noch nicht verstanden. Das Verständnis dieser theoretischen Fragestellung könnte aber wesentlich sein, um die beobachtete Strahldispersion reduzieren zu können.

Weiter wurden in den Anlagen Sedrun und Rabiusa-Realta an der Strahloberfläche immer wieder unerklärte plötzlich auftretende Phänomene beobachtet. Einerseits könnten dies Luftblasen sein, welche aus dem Strahlinneren an die Oberfläche kommen und plötzlich expandieren, andererseits könnte auch Spritzwasser hoher kinetischer Energie, welches auf den Strahl auftrifft, solche Effekte bewirken, wie sie in Bild 16 gezeigt sind.

5. Schlussfolgerungen

Thermodynamische Wirkungsgradmessung, Strahlvisualisierung und numerische Strömungsberechnung haben sich

in ihrer Kombination als ausgezeichnetes Werkzeug für eine rasche und treffsichere Analyse der Situation in den untersuchten Kraftwerken erwiesen. Schwachstellen bei den Wirkungsgraden einzelner Düsen und deren Ursachen wurden erkannt.

Mit den Strahlaufnahmen in den Kraftwerken konnten die Dispersion und die Ablenkung des Strahls quantitativ ausgewertet werden. Ein klarer Zusammenhang zwischen vergrösserter Strahldispersion und schlechterem Wirkungsgrad wurde nachgewiesen. Die Strahldispersion ist wesentlich von der Vorgeschichte der Strömung und der sich ausbildenden Sekundärströmung beeinflusst. Dies konnte in einer systematisch durchgeföhrten Laborstudie nachgewiesen werden.

Danksagung

Dank der von «swisselectric research» gesprochenen Forschungsgelder konnte diese Studie durchgeföhrten werden. Die industrielle Unterstützung erfolgte durch Andritz Hydro.

Die Autoren möchten auch der KW Zervreila AG, der Kraftwerke Vorderrhein AG, der Misoxxer Kraftwerke AG, den Nordostschweizerischen Kraftwerken und vor allem auch den Mitarbeitern der Kraftwerke Soazza, Rabiusa-Realta und Sedrun für deren Unterstützung bei

der Projektabwicklung danken.

Literatur

- [1] *Villacorta R.*, «Theoretische und experimentelle Untersuchungen an Einlaufdüsen von Freistrahlturbinen», Dissertation ETH Nr. 4678, 1972.
- [2] *Staubli T., Humm H.J., Neubacher G.*, «Schlechte Strahlqualität als Lärmursache bei Peltonturbinen», 9tes Internationales Seminar Wasserkraftanlagen, 1996.
- [3] *Staubli T., Hauser H.P.*, «Flow visualization – a diagnosis tool for Pelton turbines», IGHEM2004, Lucerne, Switzerland, 2004.
- [4] *Staubli T.*, «KW Fionnay, Grande Dixence SA, Strahlbeobachtung», Internal Report, 2004.
- [5] *Peron M., Parkinson E., Geppert L., Staubli T.*, «Importance of jet quality on Pelton efficiency and cavitation», IGHEM2008, Milan, Italy, 2008.
- [6] *Parkinson E., Vullioud G., Richard P., Heimann A., Keck H., Hauser H.P., Keiser W., Rothenfluh M.*, «Systematic Approach of Pelton Rehabilitation Projects. Practical Experience from Case Studies». Proceedings of the HydroVision 2008 Conference, HCI Publications, 2008.
- [7] *Zhang Zh., Parkinson E.*, «LDA application and the dual-measurement-method in experimental investigation of the free surface jet at a model nozzle of a Pelton turbine», 11th Int. Symp. on Application of Laser Techniques to

Fluid Mechanics, Lisbon, 2002.

- [8] *Staubli T., Abgottsporn A.*, «Efficiency differences of upper and lower injectors and scan of tailrace temperature distributions», IGHEM2008, Milan, Italy, 2008.
- [9] *Perrig A.*, «Hydrodynamics of the free surface flow in Pelton turbine buckets», EPFL These N° 3715, 2007.

Anschrift der Verfasser

Thomas Staubli, Dozent für Fluidmechanik und Hydromaschinen
André Abgottsporn, Pascal Weibel, Assistenten CC Fluidmechanik & Hydromaschinen Hochschule Luzern – Technik & Architektur CC Fluidmechanik & Hydromaschinen Technikumstrasse 21, 6048 Horw thomas.staubli@hslu.ch

Claude Bissel, Leiter Forschung und Entwicklung für Peltonturbinen, Andritz Hydro
Etienne Parkinson, Leiter Forschung und Entwicklung, Andritz Hydro, Vevey
Julien Leduc, Doktorand Ecole Centrale de Lyon und Andritz Hydro
Rue des deux gares 6, CH-1800 Vevey

H. Erne Metallbau AG CH-5316 Leuggern, Steiächer

Tel. +41 56 268 00 20 • Fax +41 56 268 00 21 • erne@h-erne.ch

Metall-/Stahlbau • Stahlwasserbau
Sonderkonstruktionen • Umwelttechnik
Anlage- und Apparatebau • Montagen/Revisionen



www.h-erne.ch

- Wehranlagen
- Druckleitungen
- Rechenanlagen
- Gleitschützen
- Notverschlüsse
- Schlauchwehre
- Revisionen

Wir sind Spezialisten für den Stahlwasserbau



Die Kommunikation
der Information

buag
Grafisches Unternehmen AG
CH-5405 Baden-Dättwil • www.buag.ch

Für Informationsfluss in geordneten Bahnen.

buag-Kommunikations-Full-Service

Für die Konzeption und Realisation von Dokumentationen, Publikationen, Berichten und Broschüren steht Ihnen ein Team von Fachleuten mit einer nahtlosen Netzwerkstruktur zur Verfügung, die sich flexibel auf Umfang und Art Ihres Informationsprojektes einstellen können. Sie halten so Ihren Informationsfluss, aber auch Ihre Budgets in geordneten Bahnen. Informieren Sie sich unter www.buag.ch und verlangen Sie die Broschüre «Die Kommunikation der Information» oder rufen Sie einfach Tel. 056 484 54 54 an.