

# Untersuchungen der Einlaufströmung einer Flusswasserkraftanlage mit optischen Messverfahren

Detlef Aigner und Petr Lichtneger (Dresden)

## Zusammenfassung

Deutschland stellt seinen Strom zu etwa 16 Prozent aus erneuerbarer Energie her (Stand 2009). Der Anteil der Wasserkraftnutzung beträgt davon etwa 20 Prozent. Viele Wasserkraftanlagen müssen sich in den kommenden Jahren einer Modernisierung unterziehen, auch um den Forderungen der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie – zum Beispiel hinsichtlich Durchgängigkeit – nachzukommen. Mit geringem Aufwand könnte gleichzeitig eine Strömungsoptimierung der Turbinenzuläufe erfolgen. Werkzeuge dafür – ob als Feldmessung oder physikalisches bzw. numerisches Modell – zeigt dieser Beitrag.

Schlagwörter: Wasserbau, Wasserkraft, Flusswasserkraftanlage, Strömung, Optimierung, physikalisch, numerisch, Modell, optisch, Messung

DOI: 10.3243/kwe2011.06.004

## Abstract

### Analyzing the Intake Flow of River Hydropower Stations with Optical Measurements

In 2009, about 16 percent of energy generation in Germany came from renewable energies, of which about 20 percent came from hydroelectricity. In the next years, many river hydropower stations have to be modernized to comply with the requirements of the European Water Framework Directive, with regard to passability for fish, for example. At the same time, it is possible to optimize the inflow of turbines with a minimum of effort. The following paper presents different instruments for this, such as measurements in situ or physical and/or numerical models.

Key words: hydraulic engineering, hydropower, river hydropower station, flow, optimization, physical, numerical, model, optical, measurement

## 1 Einleitung

Eine optimale Zuströmung zu den Turbinen an Niederdruckwasserkraftanlagen verbessert ihren Wirkungsgrad. Die Bemessung und Auslegung von Turbinen in der Auslegungsphase setzt die Annahme einer gleichmäßigen Anströmung voraus. In der Realität werden diese idealen Bedingungen nicht erreicht. Insbesondere an Flusswasserkraftanlagen mit geringen Fallhöhen kann es zur Bildung von Einlaufwirbeln (Abbildung 1) kommen, die im Extremfall Luft und Geschwemmsel ansaugen oder Schwingungen an Rechen und Turbinen erzeugen können. Das kann nicht nur zur Verringerung des Wirkungsgrades der Turbinen, sondern auch zur Zerstörung von Rechen und Turbinenschaufeln führen. Im Rahmen des Marie-Curie-Projektes I<sub>FLOW</sub> (Intake Flow Simulation and Optimization for Hydropower) der EU wurden an der Technischen Universität Dresden zwei Jahre die Möglichkeiten der Optimierung der Einlaufströmung an Wasserkraftanlagen mit Hilfe physikalischer und numerischer Modelle untersucht. Dabei konnten im Modellversuch neueste optische Messverfahren, wie die 3D-PIV-Messung oder die PTV-Messung angewendet werden. Durch den Erfahrungsaustausch auf dem Gebiet der optischen Strömungsmessverfahren mit anderen Forschungseinrichtungen und Messtechnik-Herstellern unter anderem im Rahmen eines Workshops am Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik der Technischen Universität Dresden wurde ein hohes Niveau der

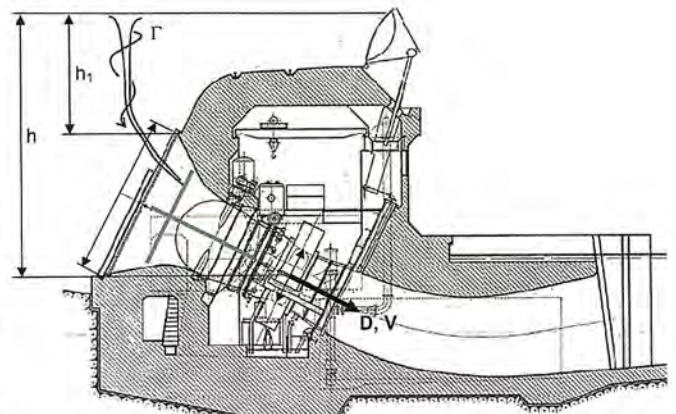


Abb. 1: Schnitt durch den Einlauf einer Rohrturbine mit Einlaufwirbel ( $h_1$  – Wasserüberdeckung,  $h$  – Überdeckung des Laufrades,  $D$  – Laufraddurchmesser,  $V$  – mittlere Fließgeschwindigkeit im Laufradprofil,  $G$  – Zirkulation am Wasserspiegel), die Messebenen für die PIV-Messung werden grün angezeigt

Strömungsmessung erzielt. Der Vergleich zwischen den Ergebnissen der numerischen und physikalischen Modellierung erlaubte Schlussfolgerungen auf den zukünftigen Einsatz numerischer Modell für diese Optimierungsaufgaben.



## 2 Einflüsse auf die Turbinenzuströmungen

Eine ungleichmäßige Zuströmung wird hervorgerufen durch eine ungünstige Anordnung der Turbineneinläufe im Strömungsquerschnitt, durch Verlandungen im Staubereich und vor den Turbineneinläufen, durch geringe Überdeckungshöhen sowie strömungstechnisch ungünstige Bauform – wie Pfeiler und scharfe Kanten oder Ecken an Konstruktionen.

Die Turbinen liegen bei Flusswasserkraftanlagen oft nicht im Strom, sondern befinden sich seitlich davon oder sind separat als Buchtenkraftwerk neben dem Fluss angeordnet. Die Strömung muss umgelenkt werden. Da jede Anlage einen anderen Aufbau hat, unterscheiden sich die Strömungsbedingungen von Anlage zu Anlage.

Vor den Turbinenzuläufen werden die Flüsse angestaut und es bilden sich infolge reduzierter Geschwindigkeiten der Strömung Ablagerungen, die bei Hochwasser wieder verlagert oder beseitigt werden können. Diese Verlandungen schnüren den Strom ein und beeinflussen ihn stark.

Geringe Überdeckungshöhe beschleunigt die Entstehung von rotierenden Strömungen und Ansaugwirbeln.

Ebenso sind umströmte Pfeiler und die daraus resultierenden Umlenkungen der Strömung, Ablösebereiche beispielsweise an scharfen Kanten oder in Totwasserzonen, also in nicht durchströmten Bereichen an Ecken oder im Strömungsschatten von Pfeilern oder Wänden Ursache für die Bildung von Wirbelströmungen. Oft verschlechtert sich durch konstruktive Veränderungen nach Rekonstruktionen der Wirkungsgrad der Turbinen.

Der Einlauf der Turbine beschleunigt die Strömung, verstärkt und stabilisiert die an der Oberfläche noch schwach aussehenden Wirbel und saugt sie ein. Nach der Größe der Zirkulationsströmung können Wirbel unterschiedlicher Stärke auftreten, von großer, kaum bemerkbarer Zirkulation bis zu einem schnellen, konzentrierten Wirbel mit Luftkern. Ein wichtiger Qualitätsparameter der Einlaufströmung ist nicht nur die gleichmäßige, symmetrische Zuströmung, sondern sie sollte möglichst drallfrei sein.

Die Drehrichtung der Turbine hat eher einen geringen Einfluss auf die Zirkulation im Zulauf. An der Wasserkraftanlage Fluhmühle an der Iller dreht der Einlaufwirbel entgegen der Drehrichtung der Turbine. Im Modell kann man sehen, dass er auch nicht auf die Turbinenachse trifft, sondern oberhalb direkt auf die Laufschaufeln.

Die Saugwirbel durchlaufen verschiedenen Stufen und können eine starke Sogwirkung erzeugen, die zum Ansaugen von Luft führt (Abbildung 2).

Die Wirbel verursachen vor allem Störungen des Strömungsfeldes mit folgenden Erscheinungen:

- Vibrationsanregungen von Rechen und Turbine bis zur Zerstörung,
- Erhöhung der Anfälligkeit zur Kavitation (Luftanteil im Wasser),
- Verringerung des Wirkungsgrades der Turbine,
- hydraulische Verluste (erhöhte Turbulenz) und
- Druckstöße und Durchflussminderungen

Es können mehrere Auswirkungen gleichzeitig auftreten und sie sind oft nicht voneinander zu trennen. Auch bei niedriger Intensität können sie zu Bauwerks- und Turbinenschäden füh-

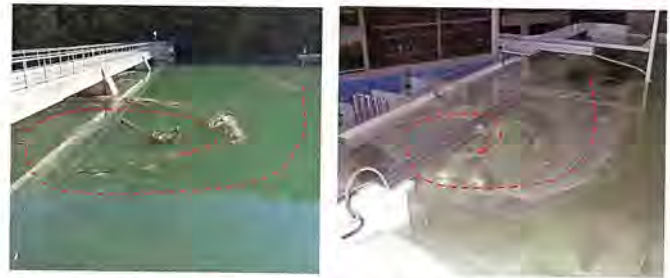


Abb. 2: Wirbelausbildung in der Natur (links) und am Modell (rechts) des Illerkraftwerks



Abb. 3: Nachbau des Kraftwerkes im hydraulischen Labor (links unten) – Feldaufnahme eines Zulaufprofils mittels ADCP

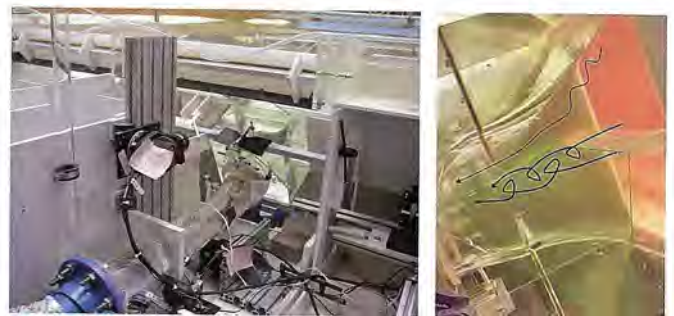


Abb. 4: Zwei Kameras des Stereo-PIV-Systems am optisch zugänglichen Turbineneinlauf, rechts eine Seitenansicht auf die Messebene (Laserschnitt)

ren. Daher wird angestrebt, die Wirbelbildung möglichst zu verhindern. Dazu müssen die primären Ursachen beseitigt werden.

## 3 Strömungsmodellierung

Neben der üblichen physikalischen Modellierung von Turbinen und ihren Einlaufkonstruktionen an einem geometrisch ähnlichen Modell werden immer mehr numerische Modelle zur Strömungsoptimierung von Turbineneinläufen verwendet. Der Aufwand für den Aufbau dieser Modelle ist ähnlich, allerdings sind numerische Modelle flexibler und schneller veränderbar und damit viel effizienter in der Ergebnisdarstellung. Ein gewisser Zweifel an der Richtigkeit der Ergebnisse numerischer Modelle führt in vielen Anwendungen zur hybriden Modellierung, zum Aufbau eines physikalischen und numerischen Modells. Durch die Nutzung beider Modelle sind die Ergebnisse fundierter und werden in der Praxis besser akzeptiert. Die hier vorgestellte hybride Modellierung im Rahmen des Marie-Curie-Projektes hatte das Ziel, Ergebnisse des physikalischen Modells





Abb. 5: Demonstration der V3V-PIV-Anlage für dreidimensionale-3-Komponenten Messung am OWC-Modell in der Wellenrinne beim Workshop in Dresden

mit denen aus dem numerischen Modell zu vergleichen und durch Veränderung der Randbedingungen und Parameter das numerische Modell so anzupassen, dass beide Modelle annähernd gleiche Ergebnisse liefern. Damit sollten Erfahrungen für den Einsatz numerischer Modelle zur Optimierung von Einlaufströmungen an Niederdruckturbinen gesammelt werden. Im ersten Schritt erfolgte dieser Vergleich an einem idealisierten buchtenförmigen Einlaufbauwerk [2]. Im zweiten Schritt wurde mit Unterstützung der Bayerischen Elektrizitätswerke GmbH im Dresdner Hubert-Engels-Labor eine Kraftwerksanlage an der Iller als physikalisches Modell im Maßstab 1:20 und als numerisches Modell nachgebaut (Abbildungen 3 und 4). Für die numerische Modellierung wurde das Programmsystem ANSYS-CFX12 verwendet. Die numerischen Simulationen wurden mit einer Zwei-Phasen-Strömung Wasser und Luft mit dem homogenen Multiphase-Modell und dem Free-Surface-Transfermodell durchgeführt. Es ermöglicht sowohl die Simulation der Einlaufströmung mit freier Oberfläche als auch die gute Nachbildung der hochturbulenten Strömung innerhalb der Turbine.

#### 4 Strömungsmessverfahren im Labor

Neben der Einhaltung der physikalischen Ähnlichkeitsgesetze sind für den Vergleich zwischen den physikalischen und numerischen Modellen modernste optische Strömungsmessverfahren erforderlich, deren entscheidende Vorteil die berührungslose Erfassung der Strömung mit hoher Auflösungsqualität ist. Ein Erfahrungsaustausch zwischen Anwendern und Herstellerfirmen aus Anlass des Dresdner Wasserbaukolloquiums 2011 fand am 9. März 2011 im Hubert-Engels-Labor der Technischen Universität Dresden statt. Neben den bereits im Hubert-Engels-Labor eingesetzten optischen Laser-Partikel-Messverfahren (3D-LDA und Stereo-PIV-System) wurden die neuesten Verfahren, das 3D-PIV (V3V) (Abbildung 5) und das PTV mit dem AICON-PROSURF 3D System für Sedimenttransport und Geschwindigkeitsmessungen in der Anwendung gezeigt.

#### 5 Strömungsmessverfahren in-situ

Zur Vorbereitung des physikalischen und numerischen Modells waren umfangreiche Messungen an der Flusswasserkraftanlage

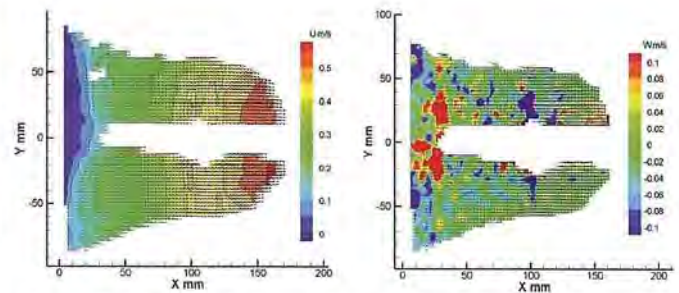


Abb. 6: Geschwindigkeitsverlauf im horizontalen Schnitt des Turbinenzulaufes aus der PIV-Messung (Längskomponente und Querkomponente)

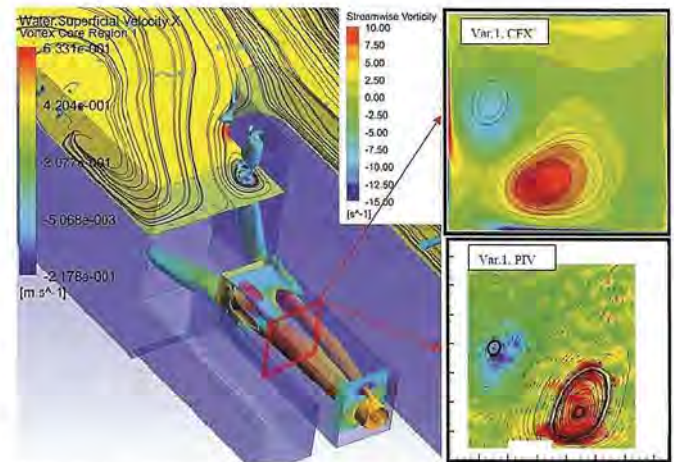


Abb. 7: Aus den numerisch-physikalischen Testuntersuchungen zu Strömungen am buchtenförmigen Einlauf (Vergleich der Rechnung – oben – und PIV-Messung – unten – im Querschnitt des Einlaufkanals)

ge an der Iller erforderlich. Sie dienen vor allem der detaillierten geometrischen Nachbildung des Kraftwerkes einschließlich der Sandbänke im Zulaufbereich des Kraftwerkes. Gleichzeitig wurden mit einem ADCP-Messgerät (Acoustic Doppler Current Profiler) Geschwindigkeitsprofile im Staubecken der Anlage ermittelt. Neben den Daten im Zulauf wurden Wasserstände, Druck und Schwingungen in der Turbine sowie die Leistung und der Durchfluss erfasst. Diese Daten dienen als Randbedingungen für den Aufbau und die Durchführung des physikalischen und numerischen Modells (Abbildungen 2 und 3).

#### 6 Vergleich zwischen numerischem und physikalischem Modell

Die numerische Strömungssimulation (CFD) hat im Bereich Wasserkraft eine lange Tradition und fließt vor allem in den maschinenbaulichen und wasserbaulichen Entwürfen und Untersuchungen ein. Im Einlaufbereich eines Flusskraftwerkes werden oft vereinfachte, zum Beispiel tiefengemittelte CFD-Modelle eingesetzt, da hier die Strömung im relativ großen Flussabschnitt stromaufwärts gerechnet wird. Die Einlaufströmung an einem Flusskraftwerk ist allerdings durch die seitliche Anordnung und demzufolge durch die streng dreidimensionale Strömung gekennzeichnet. Soll die Strömungsqualität in unmittelbarer Nähe vor dem Turbineneinlauf betrachtet werden, ist daher eine 3D-CFD Simulation inklusive des breiteren Bereichs stromaufwärts erforderlich, da außer der eigentlichen



Geometrie auch die Zufluss-Randbedingung einen entscheidenden Einfluss hat.

Die rechnerischen Ergebnisse ermöglichen mithilfe zahlreicher Visualisierungsmittel sehr detaillierte Einblicke in die Strömung. Information dieser Art können herkömmliche Messinstrumente nicht liefern. Das PIV-System ist in der Lage, die Geschwindigkeitsvektoren mit guter Auflösung aufzunehmen, es ist allerdings räumlich beschränkt. In Abbildung 6 wird die in der Turbine des Flusswasserkraftwerkes gemessene Einlaufströmung visualisiert.

Die Darstellung der Komplexität der Einlaufströmung ist allerdings erst durch die numerische Berechnung im Vergleich mit den Messergebnissen am Modell möglich (Abbildung 7).

## 7 Resümee

Die hybride Modellierung einer Wasserkraftanlage hat gezeigt, dass mit Hilfe neuester optischer Strömungsmessverfahren sehr komplexe Referenzdaten aus einem physikalischen Modell ermittelt werden können, die sich mit den Ergebnissen aus numerischen Simulationen vergleichen lassen und zur Validierung eingesetzt werden können.

Ziel dieser Arbeit war es, die numerischen Ansätze so zu beeinflussen, dass sie realistische, der Wirklichkeit entsprechende Ergebnisse liefern. Zukünftig soll es möglich sein, auch ohne die hybride Modellierung numerische Modelle bei der Untersuchung von Einlaufströmungen in Wasserkraftanlagen einzusetzen.

Die anspruchsvolle berührungslose optische Messtechnik hat sich als vorteilhaft für die aktuellen Untersuchungen von Wasserkraftanlagen und deren Einlaufströmungen erwiesen und wird zur Realisierung anspruchsvoller Aufgaben im was-

serbaulichen hydraulischen Versuchswesen weiterhin eingesetzt und empfohlen.

## Dank

Unser Dank gilt dem Förderprogramm der Europäischen Kommission im Rahmen des Marie-Curie-Projektes und den Bayerischen Elektrizitätswerken GmbH für die Unterstützung beim Aufbau des physikalischen Modells.

## Literatur

- [1] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU): Erneuerbare Energien in Zahlen, 6/2010.
- [2] Aigner, D., Lichtneger, P.: Ein Beitrag zur Strömungsoptimierung an Wasserkraftanlagen am Beispiel eines Buchtenkraftwerkes. 13. Internationales Anwenderforum Kleinwasserkraftwerke. 23./24. September 2010, Kempten, Allgäu.
- [3] Aigner, D., Lichtneger, P., Martin, H.: Anwendung des Stereo-PIV-Systems zur Erfassung der Einlaufströmung am Modell eines Buchtenkraftwerkes. Fachtagung „Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik“, 7.-9. September 2010, Cottbus.

## Autoren

*apl. Prof. Dr.-Ing. habil. Detlef Aigner*

*Petr Lichtneger, Ph. D.*

*Technische Universität Dresden*

*Institut für Wasserbau und THM*

*Helmholtzstraße 10*

*01062 Dresden*

*E-Mail: Detlef.Aigner@tu-dresden.de*

KW

**Fachliteratur  
online bestellen  
im DWA-Shop**

[www.dwa.de/shop](http://www.dwa.de/shop)

E-Mail: [kundenzentrum@dwa.de](mailto:kundenzentrum@dwa.de)



**Abonnieren Sie unseren  
kostenlosen monatlichen  
Newsletter**

[www.dwa.de/news](http://www.dwa.de/news)



**Ihr direkter Kontakt  
zur Bildungshotline**

Tel.: 02242 872-222

Fax: 02242 872-135

