

Ein Beitrag zur Strömungsoptimierung an Wasserkraftanlagen am Beispiel eines Buchtenkraftwerkes

Detlef Aigner, Petr Lichtneger
Helmholtzstraße 10, D-01062 Dresden
Tel.: +49 351 463 34725, Fax: +49 351 463 37120
E-Mail: Detlef.Aigner@tu-dresden.de, Petr.Lichtneger@tu-dresden.de
Internet: www.iwd.tu-dresden.de

Einleitung

Die Problematik der Einlaufströmung ist besonders an Wasserkraftanlagen mit niedrigen Fallhöhen von großer Bedeutung, da hier die entstehenden hydraulischen Verluste und Strömungsfeldverzerrungen die Betriebsbedingungen der Turbinen stark beeinträchtigen können. Besonders durchströmte Flusskraftanlagen werden im Einlaufbereich den lokalen Erfordernissen individuell angepasst. Das Ziel der Modernisierung bei älteren Kraftanlagen ist häufig auch die Erhöhung der Ausbauleistung. Diese Maßnahmen können sich auf die bisher (quasi-) optimale Anströmung negativ auswirken. Außer einer Turbinen-Modernisierung können auch andere Gründe, wie z.B. eine Verlandung des Staubeckens, die Anströmverhältnisse im Laufe der Zeit stark beeinflussen.

Eine Wirbelbildung an der freien Oberfläche vor Einläufen wird durch die Geometrie, die einfließenden Wassermengen und die Wasserüberdeckung über der oberen Einlaufkante bestimmt. Die Wirbelerscheinungen verursachen vor allem Störungen des Strömungsfeldes und im Fall der stärkeren Form auch einen Sog. Zu den Auswirkungen gehören:

- Vibrationsanregungen,
- Erhöhung der Anfälligkeit zur Kavitation (Luftanteil im Wasser),
- Verringerung des Wirkungsgrades der Turbine,
- Hydraulische Verluste (erhöhte Turbulenz),
- Druckstöße und Durchflussminderungen.

Es können mehrere Auswirkungen gleichzeitig auftreten und sie sind oft nicht voneinander zu trennen. Auch bei niedriger Intensität können sie zur Bauwerks- und Turbinenschäden führen. Zur Verhinderung der Wirbelbildung müssen die primären Ursachen beseitigt werden. Das sind z.B. die Umgestaltung des Staubeckens (Trennpfeilerform, Einbau der Leitwände, usw.) oder die Optimierung der Betriebsregelung (Durchflussregelung nach dem Wasserstand, Mitwirkung von benachbarten Turbinen, usw.). Andere Möglichkeiten sind spezielle Konstruktionen,

wie z.B. schwimmende Verbundbalken (Gitter), die gegen die Bildung eines Oberflächenwirbels wirken. Zur Beruhigung der Einströmung tragen der Rechen und die Querschnittreduzierung in Fließrichtung bei.

Verallgemeinerte Untersuchungsergebnisse existieren bisher vor allem von Einlaufbauwerken an Hochdruckanlagen mit durchflussabhängigen Anströmungsgeschwindigkeiten oder ohne Anströmgeschwindigkeit bei großen Staubecken. Für Niederdruckanlagen müssen individuelle Lösungen mittels physikalischer oder numerischer Untersuchung ermittelt werden. Heutzutage stellen die numerischen Verfahren eine kostengünstigere Variante dar. Es ist allerdings erforderlich, die numerischen Ergebnisse durch die physikalischen Untersuchungen zu verifizieren.

Zielsetzung

Im Rahmen des Marie-Curie-Projektes IFLOW (Intake flow simulation and optimisation for hydropower) wurde das Einlaufbauwerk eines Buchtenkraftwerkes als vereinfachtes physikalisches Modell im Hubert-Engels-Labor (HEL) des Instituts für Wasserbau und THM der TU Dresden nachgebildet. Das Ziel ist es, das entsprechende numerische Modell am physikalischen Modell zu validieren und nach numerischer Optimierung der Einlaufströmung die resultierende Geometrie zu verifizieren. Dadurch wird das numerische Verfahren für seine Eignung für den Einsatz an anderen Anlagen getestet.

Testgeometrie – das physikalische Modell

Das physikalische Modell stellt eine sehr vereinfachte und idealisierte Einlaufkonfiguration eines Buchtenkraftwerkes dar. Es wird eine 30 m lange Versuchsrinne (Breite 80 cm, Wassertiefe bis zu 80 cm) als „Fluss“ genutzt. Das eigentliche Einlaufbauwerk wurde im hinteren Teil der Rinne seitlich angesetzt. Das Einlaufbauwerk ist mit dem rundköpfigen Trennpfeiler und zwei quadratischen Turbinenkanälen ($d = 0,15\text{m}$) ausgestattet. Mithilfe eines in der Hauptrinne platzierten Wehrobjectes kann die Wirkung der Strömung im Staubecken simuliert werden (Abb. 1). Der untersuchte Einlauf besitzt bei einem gegebenen Wasserstand von $h=0,269\text{ m}$ über der Achse des Turbinenkanals und einem Durchfluss $Q_3=10,2\text{ l/s}$ folgende dimensionslosen Parameter:

$$Fr = \frac{Q}{d^2 \cdot \sqrt{g \cdot h}} = 0.28; \quad Re = \frac{Q}{v \cdot h} = 37680; \quad We = Q \cdot \sqrt{\frac{\rho}{\sigma \cdot d^3}} = 20.5$$

Die örtliche Zirkulation Γ , die z.B. für die oft betrachtete kritische Einlaufabsenkung bestimmend ist, ergibt sich dann aus der gesamten Geometrie- und Zufluss-Randbedingung, und kann durch die Messung ermittelt werden. Zur Strömungserfassung wurde das Stereo-PIV-System von TSI eingesetzt. Die berührungslose PIV-Messung ermöglicht Aufnahme der Geschwindigkeitsvektoren in

einer durch das Laserlicht definierte Ebene. Die Messung erfolgte beim stabilen Strömungszustand in 4 horizontalen Laserschnitt-ebenen (Abb. 1).

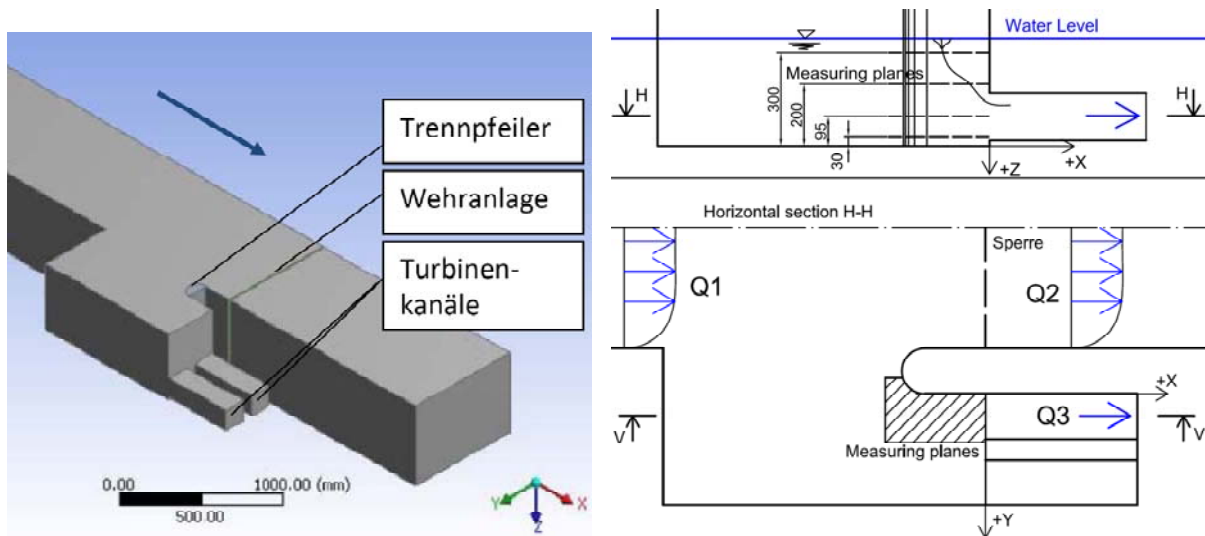


Abb. 1 Digitalisiertes Modell und Skizze zur Lokation der Messebene

Es werden zwei getesteten Varianten dargestellt:

1. $Q_2 = 40.5 \text{ l/s}$, $Q_3 = 10.2 \text{ l/s}$ (Abfluss durch die Hauptrinne und den Turbinenkanal)
2. $Q_2 = 0$ (Sperre als Wehr), $Q_3 = 10.2 \text{ l/s}$ (Abfluss nur durch den Turbinenkanal)

Im Verhältnis zum eigentlichen Einlauf werden im ersten Fall hohe Geschwindigkeiten im Vorfeld der Bucht simuliert. Bei dieser Konfiguration ist eine wirbelbehaftete Strömung deutlich erkennbar (Abb. 2). Ein stabiler oberflächlicher Wirbel mit einer Delle von Wirbelstufe 2 (Hecker, 1987) entsteht im „Schattenbereich“ des Trennpfeilers. Die relativ hohe Energie der Anströmung wird durch Bildung des Wirbels zerstreut. In dem zweiten Fall sind die Anströmungsgeschwindigkeiten zur Bucht sehr klein, die Strömung wirkt sehr ruhig. Der oberflächliche Wirbel bildet sich intermittierend und erreicht die Wirbelstufe 1, selten die Stufe 2.

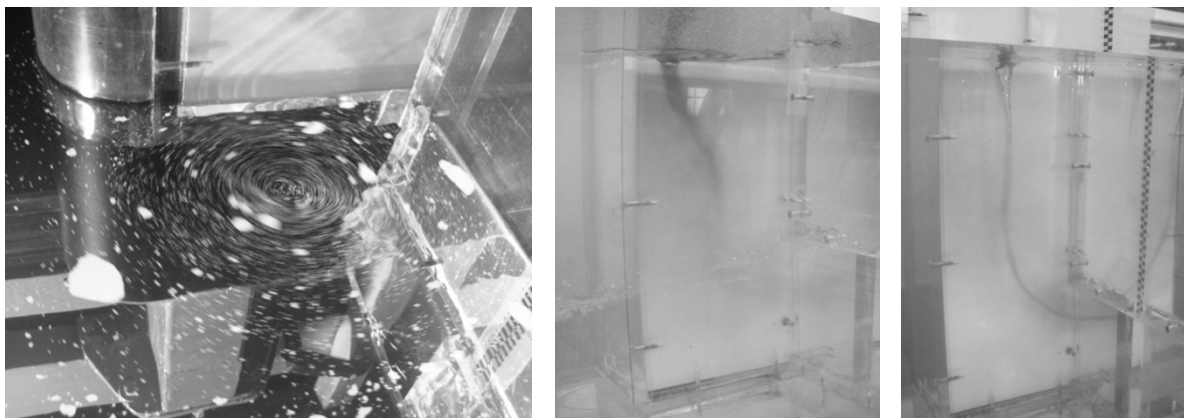


Abb. 2 Visualisierung des oberflächlichen Einlaufwirbels, Variante 1 (am rechten Foto ein stärkerer Wirbel beim höheren Wasserstand und Abfluss)

Das numerische Modell

Die numerischen Simulationen wurden mit zweiphasen-Strömung Wasser-Luft mit dem homogenen Multiphase-Modell und dem Free-Surface-Transfermodell an der digitalisierten Domäne (Abb. 1) in ANSYS-CFX durchgeführt. Die Domäne wurde vorwiegend mit Tetraedern diskretisiert und in dem Buchtenbereich und an dem Wasserspiegel extra verfeinert. Die Randbedingungen wurden in Übereinstimmung mit dem physikalischen Modell eingesetzt. Die Geometrie sowie die Randbedingungen weichen für die beiden Varianten mit und ohne Sperre ab. Als Turbulenzmodell wurde erfolgreich das Shear-Stress-Transportmodell getestet. Der Einfluss der Turbulenzmodelle und der Netzqualität wird bereits weiter systematisch untersucht.

Ergebnisse

Die rechnerischen Ergebnisse ermöglichen mithilfe zahlreicher Visualisierungsmittel sehr detaillierter Einblick in die Strömung. Information der Art können herkömmliche Messinstrumente nicht liefern. Das PIV-System ist in der Lage, die Geschwindigkeitsvektoren mit guter Auflösung aufzunehmen, es ist allerdings räumlich beschränkt. Auf der Abb. 3 wird die gerechnete Einlaufströmung der Variante 1 (ohne Sperre) visualisiert. Es werden auch die Messebenen hervorgehoben, auf denen der Vergleich der Numerik und der Messungen geschieht. Die Visualisierung zeigt die Komplexität der Einlaufströmung.

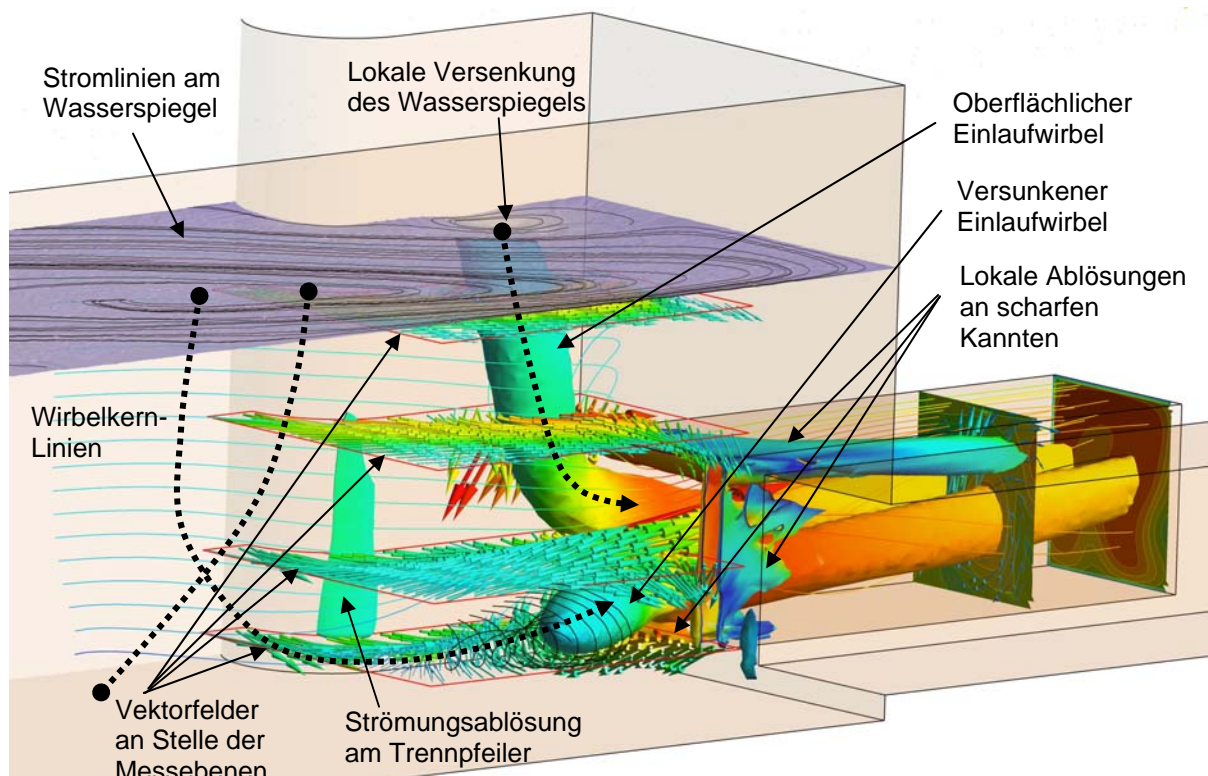


Abb. 3 Visualisierung der Einlaufströmung aus der Berechnung, Variante 1

Es gibt den oberflächlichen Einlaufwirbel in der Ecke am Trennpfeiler und einen paarigen Wirbel mit der entgegengesetzten Drehrichtung. Dieser Wirbel entsteht im Bereich der Bucht und kann nur durch die größere Rückströmungszone am Wasserspiegel vermutet werden. In der Tat ist die Strömung in der Bucht noch komplexer, für das Einlaufprofil sind allerdings nur die zwei Einlaufwirbel von Bedeutung. Diese beiden Wirbel beteiligen sich an der Verzerrung des Geschwindigkeitsprofils am Einlauf. Am physikalischen Modell ist es praktisch unmöglich, den ausgebildeten Einlaufwirbel zu erfassen. Die PIV-Messungen haben ihn teilweise (in vorgenommenen Messebenen) bestimmt, allerdings konnte erst die numerische Berechnung im Vergleich mit den Messergebnissen den Wirbel vollständig nachbilden.

Auf den nächsten Beispielsabbildungen wird ein qualitativer Vergleich der Rechnung mit der PIV-Messung mit guter Übereinstimmung dargelegt (Abb. 4, 5). Quantitativ betrachtet liegt der Oberflächenwirbel aus der Berechnung näher am Einlauf. Auch die einzelnen Geschwindigkeitskomponenten und die Grenze zwischen beiden Einlaufwirbeln (Abb. 5) weichen voneinander ab.

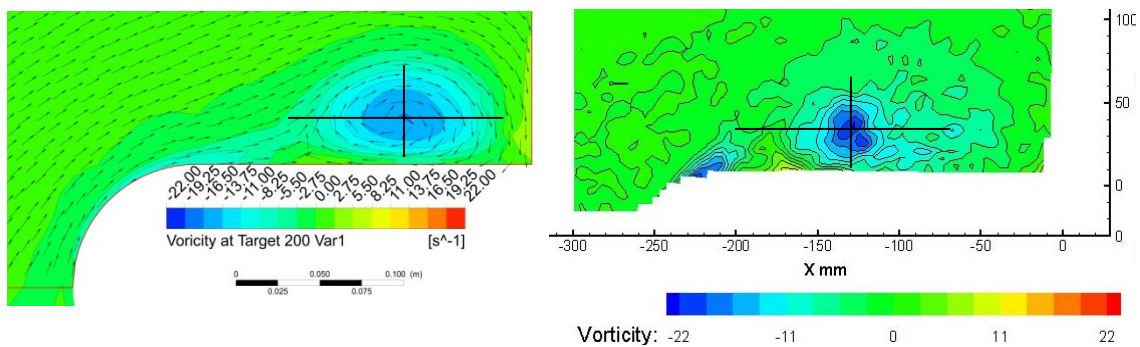


Abb. 4 Vorticity, Berechnung links vs. PIV-Messung rechts (Ebene 200 mm, Variante 1)

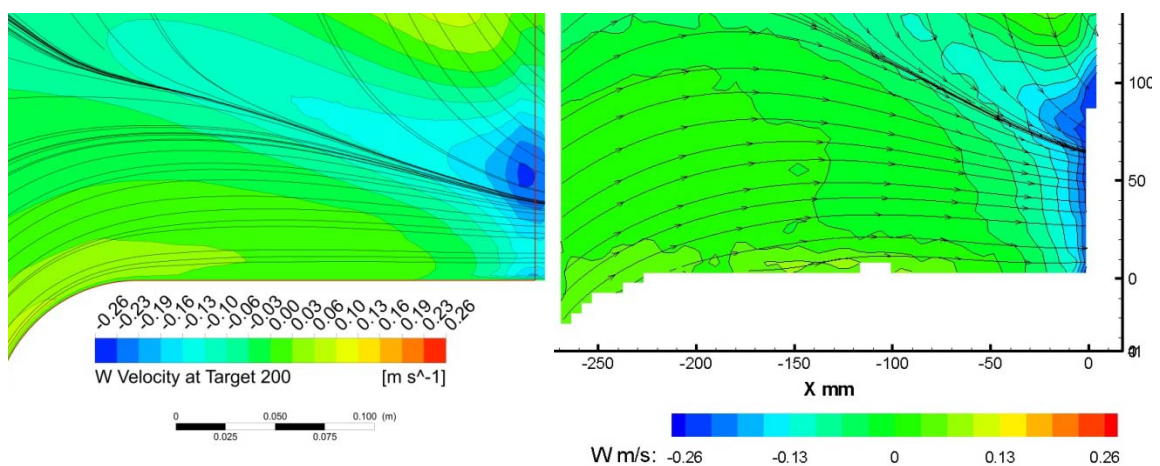


Abb. 5 W-Geschwindigkeit, Berechnung links vs. PIV-Messung rechts (Ebene 30 mm, Variante 1)

Für die effektive Wasserkraftnutzung ist das gleichmäßige Geschwindigkeitsprofil in dem Turbinenkanal sehr wichtig. Das gerechnete Einlaufprofil unter Strömungs-

bedingungen der Variante 1 (Abb. 6 links) ist zweifach spiralförmig und die Verteilung der Längsgeschwindigkeit bildet eine Hufeisenform. Bei der Variante 2 (mit Sperre) ist die Anströmung ruhiger, der Stauraum des Buchtbeckens ist relative zur Einlaufmenge groß und die Geschwindigkeits-Randbedingung am Zulauf in die Domäne hat deshalb einen geringen Einfluss. Die Stärke der Einlaufwirbel ist deutlich kleiner geworden, der abtauchende Einlaufwirbel beeinflusst das Geschwindigkeitsprofil im Turbinenkanal nicht (Abb. 6 rechts).

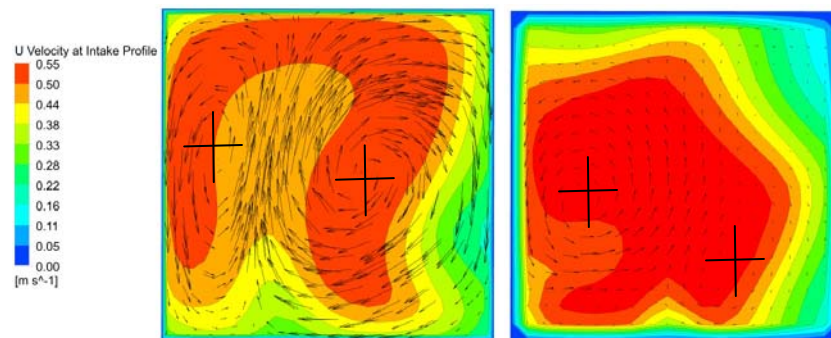


Abb. 6 Geschwindigkeitsprofil im Turbinenkanal aus der Berechnung, Variante 1 (links) vs. Variante 2

Zusammenfassung und Ausblick

Die Einlaufströmungen an Wasserkraftanlagen werden durch die Geometrie- und Zulauf-Randbedingung vorgegeben und müssen individuell untersucht werden. Am Beispiel eines Einlaufbauwerkes wurde unter Laborbedingungen gezeigt, wie kompliziert sich die Strömung an der relativ einfachen Geometrie ausbilden kann. Mithilfe des physikalischen Modells wurde das numerische Modell validiert. Es wurden zwei Strömungsvarianten mit gleicher Einlaufgeometrie aber unterschiedlicher Geschwindigkeitsrandbedingung am Zulauf dargelegt. Die Änderung dieser Randbedingung wirkt sich stark auf das betrachtete Strömungsfeld im Turbinenkanal aus.

Das numerische Modell wird demnächst für die Geometrieoptimierung weiter getestet. Die im Labor gewonnenen Einlauf-Geschwindigkeitsprofile werden für die Strömungssimulation einer realen Turbine verwendet und dadurch die Einwirkung auf das Turbinenverhalten untersucht.

This research was supported by a Marie Curie Intra European Fellowship within the 7th European Framework Programme Marie-Curie

Hecker, G.E., 1987: „Fundamentals of vortex intake flow“, in Knauss, J. (Coordinator-editor): “Hydraulic structures design manual - Part 1: Swirling flow problems at intakes”

Lichtneger, P., 2009: "Intake Flow Problems at Low-Head Hydropower", Dresdener Wasserbauliche Mitteilungen, Heft 39, pp. 259-266

Weiterer Literaturverweis unter: <http://tu-dresden.de/bau/iflow>