

ANWENDUNG DES STEREO-PIV-SYSTEMS ZUR ERFASSUNG DER EINLAUFSTRÖMUNG AM MODELL EINES BUCHTENKRAFTWERKES

USE OF THE STEREO PIV SYSTEM FOR CAPTURE OF INTAKE FLOW PATTERNS ON A PHYSICAL MODEL OF A BAY-TYPE RUN-OFF RIVER POWER PLANT

Detlef Aigner, Petr Lichtneger, Herbert Martin
TU Dresden, Institut für Wasserbau und THM

Schlagworte: Flusskraftwerk, Einlaufströmung, Strömungssimulation, Stereo-PIV
Key words: run-off river power plant, intake flow, flow simulation, stereo PIV

Zusammenfassung

Für die Verifizierung von numerischen Modellen zur Strömungssimulation und -optimierung an Einläufen zu Flusskraftwerken wurde ein Modell eines vereinfachten Buchtenkraftwerkes mit einem Trennpfeiler im hydraulischen Labor der TU Dresden erstellt. Ein Stereo-PIV-System wurde für die Datenerfassung eingesetzt. Die Messungen erfolgten in horizontalen Ebenen, womit die Strömung vor dem Einlauf mit dem typischen oberflächlichen Einlaufwirbel bei bestimmten Randbedingungen quantifiziert werden konnten. Im Beitrag werden der Versuchstand und Teil der ersten Messergebnisse dargestellt. Die Geometrie und vollständigen Ergebnisdaten werden im Internet unter „<http://tu-dresden.de/bau/iflow>“ zur Verfügung gestellt.

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.

Die numerische Strömungssimulation (CFD) hat eine lange Tradition in den maschinenbaulichen und wasserbaulichen Entwürfen und Untersuchungen. Dennoch besteht der Bedarf die numerischen Ergebnisse durch die physikalischen Untersuchungen zu validieren bzw. zu verifizieren. In dem Einlaufbereich eines Wasserkraftwerkes werden oft vereinfachte, z.B. tiefengemittelte CFD-Modelle eingesetzt, da hier die Strömung im relativ großen Flussabschnitt stromaufwärts gerechnet wird. Die Einlaufströmung an einem Buchtenkraftwerk ist durch die seitliche Flussanbindung und dem zufolge durch die starke

dreidimensionale Strömung gekennzeichnet. Wollen wir die Strömungsqualität in unmittelbarer Nähe vor dem Turbineneinlauf betrachten, ist daher eine 3D-CFD Simulation erforderlich.

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 der Einlaufströmung am physikalischen Modell zu validieren und nach numerischer Optimierung die resultierende Geometrie zu verifizieren. Dadurch wird das numerische Verfahren für weiteren Einsatz getestet.

Die Laser-Doppler-Anemometrie findet am Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik Dresden (IWD) bei vielen wasserbaulichen Untersuchungen, wie z.B. der umströmten oder überströmten Körper, ihre traditionelle Anwendung. Für die Untersuchung des Buchtenkraftwerkes, wurde allerdings das relativ neu angeschaffene Stereo-PIV-System eingesetzt. Mit den Vorbereitungen der Messungen, sowie mit den eigentlichen Messungen, wurden wichtige Erfahrungen auch für zukünftige Messungen mit dem Stereo-PIV-System gesammelt.

Unser Beitrag konzentriert sich deshalb auf die Untersuchung eines physikalischen Modells mithilfe des Stereo-PIV-Systems. In nächsten Kapiteln werden das physikalische Modell mit dem Kreislauf dargestellt und das angewendete PIV-System und die Konfiguration des Versuchstandes beschrieben. Zum Schluss werden die ersten Ergebnisse dargelegt.

Physikalisches Modell

Der typische Aufbau eines Buchtenkraftwerkes ist durch einen Trennpfeiler und den seitlichen Abschlag der Strömung gekennzeichnet. Die Strömungsparameter werden in diesem Fall durch die Geometrie beeinflusst. Das im Hubert-Engels Labor des Institutes gebaute physikalische Modell stellt eine sehr vereinfachte Einlaufkonfiguration eines Buchtenkraftwerkes dar - Einlaufbauwerk mit geraden Wänden ohne Turbinen. Es wurde die bestehende 30 m lange Versuchsrinne (Breite 80 cm, Wassertiefe bis zu 80 cm) als „Fluss“ genutzt, in deren hinterem Teil der Körper des eigentlichen Einlaufbauwerks seitlich angesetzt wurde.

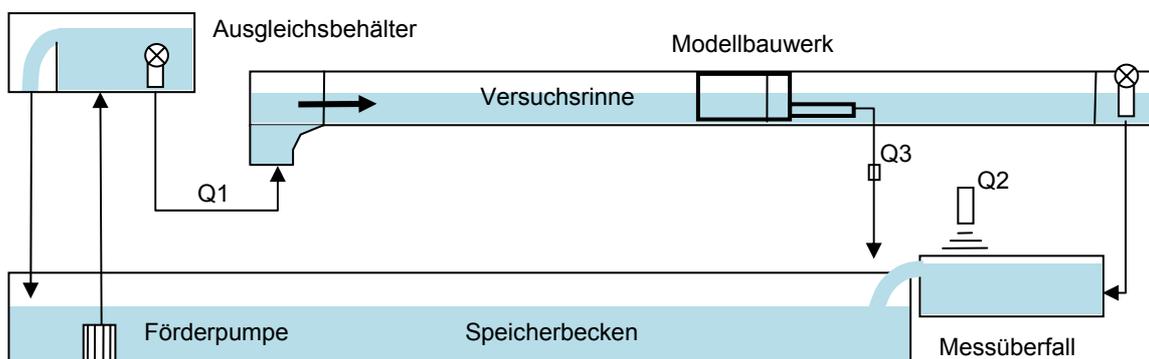


Abb. 1: Schema des Wasserkreislaufs

Die mit Glaswänden ausgestattete Versuchsrinne wird von einem Hochbehälter gespeist. Die Durchflussmenge kann über Schieber eingestellt werden. Der Abfluss aus der Rinne wird mithilfe eines Messüberfalls (Thompson-Wehr) bestimmt. Dieser Messüberfall befindet sich im Untergeschoss sowie die Wasserhaltung mit einem Speichervolumen von 90 m^3 . Der

Durchfluss durch den Turbinenkanal wird am Abflussrohr durch einen Magnetisch-induktiven Durchflussmesser bestimmt. Ein Schema des Kreislaufes gibt die Abb. 1 wieder. Den Kreislauf kann man als quasi-geöffnet bezeichnen, einerseits wegen dem freien Wasserspiegel, andererseits wegen dem großen Wasservolumen, was durch die Partikel-Zugabe nicht völlig saturiert werden konnte.

Das eigentliche physikalische Modell besteht aus Acrylglas und wurde als seitlicher Abschlag aus der Versuchsrinne konzipiert. Das Einlaufbauwerk ist mit zwei Turbinenkanälen ausgestattet, allerdings wird zunächst nur der Betrieb von dem flussseitigen Kanal bzw. dem flussseitigen Maschinensatz simuliert. Für diesen Fall werden die stärksten Auswirkungen der seitlichen Anströmung erwartet. Die Sohle der Hauptrinne, der Kraftwerksbucht und der Turbinenkanäle sind voneinander vertikal abgesetzt. Mithilfe eines in der Hauptrinne platzierten Wehrobjectes kann auch die Auswirkung auf die Strömung im Staubecken simuliert werden. Das Modell soll das physikalische Vorbild für den numerischen Ansatz darstellen und die Daten für Validierung und Verifizierung der Berechnungen liefern. Als Optimierungsvariablen werden die Trennpfeilerform, Leitwände und weitere Einbauten im Einlaufbereich betrachtet. Die präsentierte Geometrie, s. Abb. 2, wird im Internet unter „<http://tu-dresden.de/bau/iflow>“ zur Verfügung gestellt.

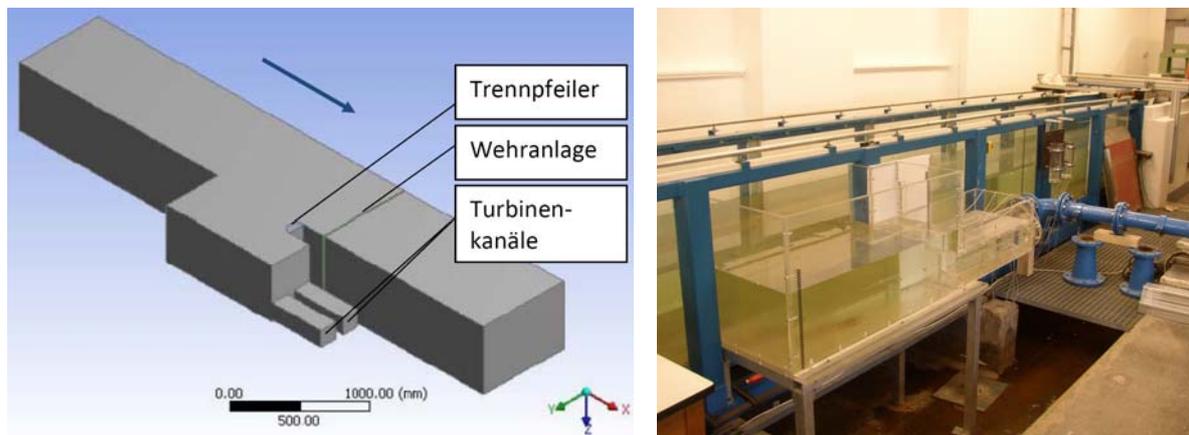


Abb. 2: Digitalisiertes Modell und die Laborausführung

Strömungsbeobachtungen

Bei der Durchführung des Forschungsvorhabens wurde bisher der Fließzustand mit folgenden Parametern bearbeitet – Zufluss Hauptrinne: 50.7 l/s, Abfluss Hauptrinne: 40.5 l/s, Durchfluss Turbinenkanal: 10.2 l/s, Wasserstand am Zufluss: 46.2 cm, Wasserstand am Abfluss: 45.5 cm, Wasserstand an der Messstelle: 45.3 cm (im PIV-Koordinatensystem $z = -353$ mm), Trennpfeiler: rundköpfig. Bei dieser Konfiguration ist eine Strudelströmung erkennbar. Sie befindet sich zwischen Turbineneinlauf und Trennpfeiler. Es handelt sich um einen stabilen oberflächlichen Wirbel mit einer Delle von niedriger Intensität bzw. Stärke der Stufe 2 nach Hecker 1987 (Vortex Strength Type 1-6). Die Wirbelstärke nimmt mit steigendem Durchfluss durch den Turbinenkanal zu. Da dieser Durchfluss am Modell nur vom Wasserstand abhängt, werden stärkere Einlaufwirbel mit erhöhtem Wasserstand erreicht. Eine Visualisierung dieser Wirbel ist in der Abb. 3 zu sehen.

Die Strömungsinhomogenitäten sind am physikalischen Modell mit einfachen Mitteln praktisch nicht erfassbar und der Einsatz von konventionellen nicht-berührungslosen Messmethoden würde die beobachtete Strömung beeinträchtigen. Die Anwendung des PIV-Systems war deshalb in diesem Sinne vorteilhaft.

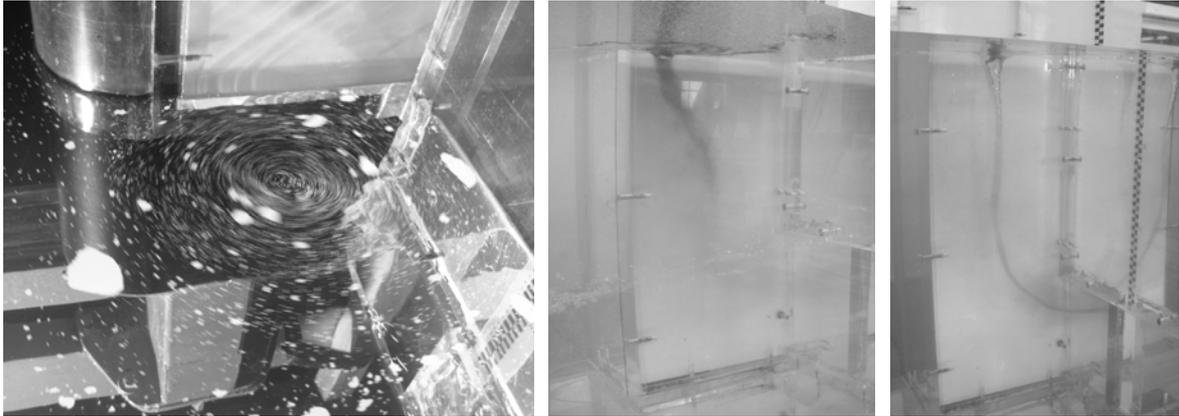


Abb. 3: Visualisierung des oberflächlichen Einlaufwirbels (am rechten Foto ein stärker Wirbel beim höheren Wasserstand und Abfluss)

Anordnung des Experiments

Zur Strömungserfassung wurde das Stereo-PIV-System von TSI eingesetzt. Die Einzelkomponenten werden in folgender Tabelle (Abb. 4) spezifiziert.

Software	TSI Insight3G, Tecplot, Matlab
Laser	Nd: YAG-15NW New Wave Solo Laser, $\lambda = 1064/532$ nm, rep. f = 14,5 Hz Lichtarm, Laser-Diode 532 nm, 1 mW (handelsüblicher Laser Pointer)
Kameras	2 x 630057 Power-View Plus 2MP Cam mit 1600x1200 Pixel Auflösung 2 x Objektiv Nikon 28mm
Synchroniser	TSI Laser-Pulse-Synchronizer 610034
Seeding	Polyamid 12, $d_{50} = 100$ μm , $d_{\text{max}} = 250$ μm , $d_{\text{min}} = 30$ μm , $\rho = 1060$ kg/m^3

Abb. 4: Wichtigste Systemelemente im Überblick

Die Messung erfolgte beim stabilen Strömungszustand in 4 horizontalen Laserschnittebenen ($z = -30, -95, -200$ und -300 mm, siehe Abb. 5). Das Hauptinteresse der Strömungserfassung galt dem Bereich vor dem Einlauf in den Turbinenkanal, d.h. entlang des Trennpfeilers. Um die beste Übersicht über der Strömung zu bekommen, wurde ein möglichst großes PIV-Messgebiet ausgewählt. Unter Berücksichtigung der technischen und räumlichen Bedingungen wurde ein Gebiet von circa 200 mm x 300 mm aus der Überlagerung der beiden Kamerabilder eingestellt, wobei auch ein Teil der gerundeten Wand des Pfeilerkopfes in den Aufnahmen enthalten ist. Die Kameras sind unsymmetrisch angeordnet. Die Winkel zwischen Kamera und Target werden in der Abbildung 5 mit Angle L und Angle R bezeichnet (Winkel Angle L = 60° und der Winkel Angle R = 85°).

Das Standard-Kalibrierungstarget von TSI konnte auf Grund der speziellen Pfeiler-Geometrie nicht verwendet werden. Deshalb wurde ein Target hergestellt, welches die tatsächliche Geometrie wieder gibt. Es handelt sich hier um eine Kunststoffplatte mit einer bedruckten Klebefolie. Das Punkteraster wurde 10 mm gewählt und die Fiducial-Marke auf $x = -173,73$ mm, $y = 73$ mm gesetzt (siehe Abb. 5b). Das Ein-Ebenen-Target wurde an einer verstellbaren Halterung befestigt, die eine feine für die räumliche Kalibrierung benötigte Traversierung mithilfe einer Mikrometerschraube ermöglichte (siehe Abb. 5c). In jeder Position wurden insgesamt 9 Kalibrierungs-Frames mit einem Schritt $\Delta z = 0,25$ mm aufgenommen. Da auf dem optischen Weg Materialgrenzen (Luft-Acryl-Wasser) mit unterschiedlichen

Brechungsverhältnissen lagen, musste die Kalibrierung einzeln für jede Messebene durchgeführt werden. Die Schnittzeichnungen, die Photographie des Targets und die Kalibrierungsvorrichtung werden in der Abb. 5 dargestellt.

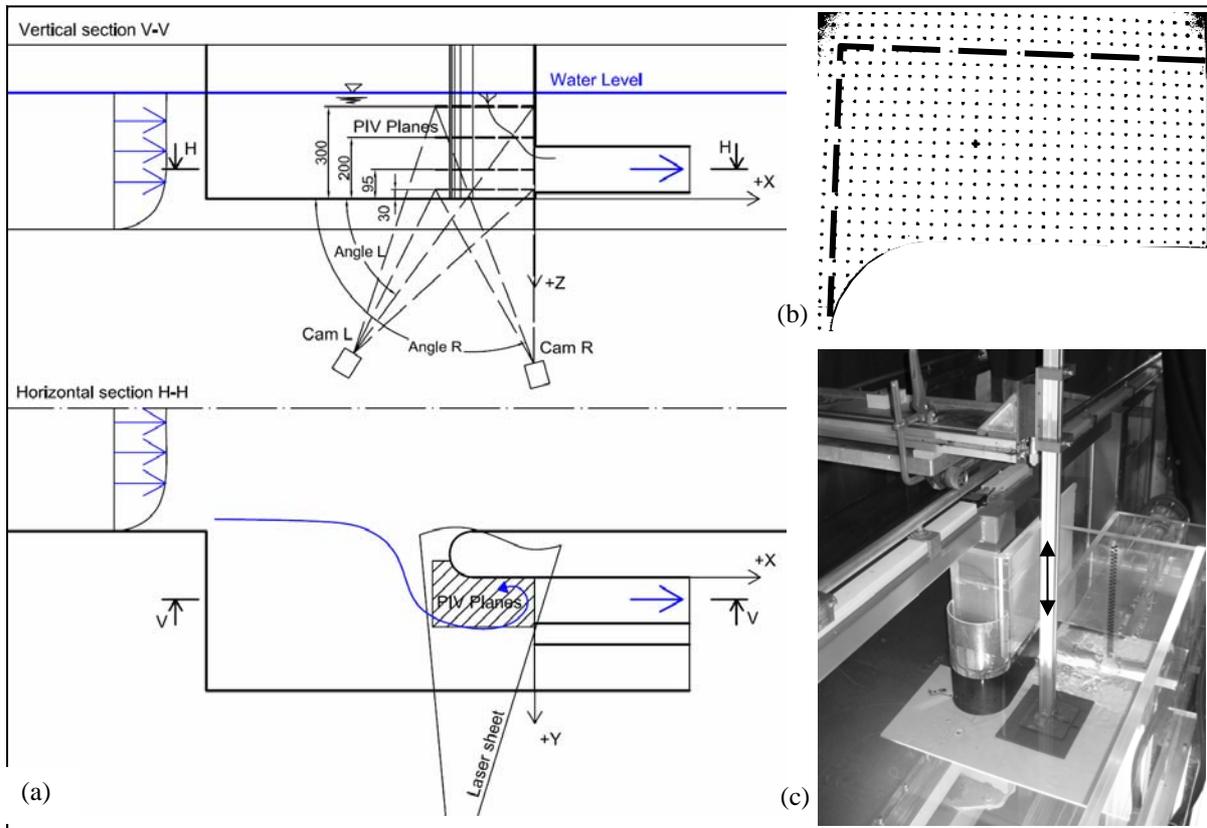


Abb. 5: Schnittzeichnungen des Modell-Einlaufbauwerkes (a), Target mit gekennzeichnetem Auswertungsgebiet (b) und Traversierungsvorrichtung (c)

Für die Positionierung des Targets wurde eine handelsübliche Laserquelle der Laserklasse 1 (ungefährlich, $<1 \text{ mW}$) mit der Wellenlänge von 532 nm als Kalibrierungslaser verwendet. Der Nachweis, dass die optischen Wege des PIV-Lasers und des „Kalibrierungslasers“ gleich sind, wurde mithilfe des Burn-In-Paper erbracht. Das externe Kalibrierungslaserlicht wird in den Laserlichtarm eingekoppelt, ohne die bestehende optische Konfiguration umzustellen. Durch diese Ausführung ist eine Positionierung des Targets arbeitsschutzmäßig völlig ungefährlich und äußerst praktisch. Während der eigentlichen PIV-Messung werden weitere Schutzmaßnahmen wie Warnleuchten, Warnschilder und Einhausung des Modellversuches durch Verdunklungsstoffe getroffen.

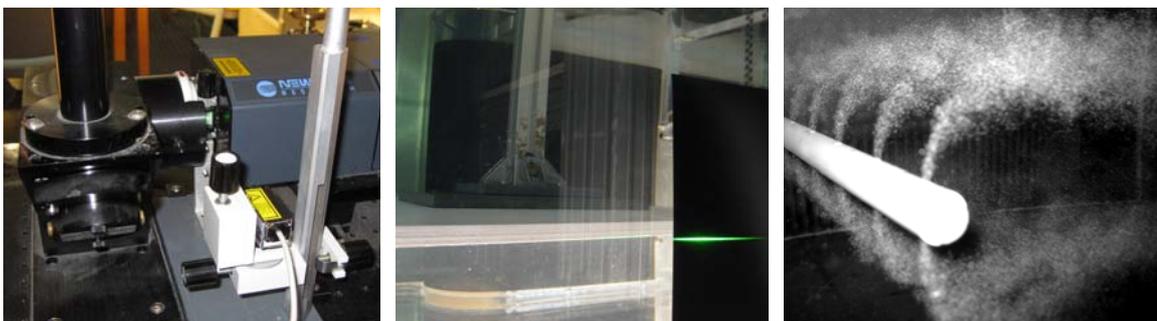


Abb. 6: Anwendung externer Laserquelle (532 nm , $<1 \text{ mW}$) auf Positionierung des Targets und Einführung der Partikel-Suspension (Bild rechts)

Mit der Kameraauflösung von 1600 x 1200 Pixel ist das Pixelausmaß ca. 0,2 mm. Es werden dadurch relativ große Streuteilchen benötigt. Die Polyamid-12-Partikel mit einem Durchmesser von 100 μm wurden erfolgreich getestet. Die Partikeldichte beträgt 1,06 g/cm^3 und die Reflektion erreichte bis zu 8 Pixel.

Da der Kreislauf über ein großes Wasservolumen verfügt, wurde bisher die optimale Sättigung nicht erreicht und die Partikel mussten bei jeder Messaufnahme vor dem Modellbauwerk ins Wasser eingeführt werden. Die Partikelzugabe erfolgte mithilfe einer Dosierungsvorrichtung. Die Partikelsuspension wird in einem Vorratsbehälter mit mechanischem Mischer vorgehalten. Die Einführung der Partikel ins Wasser erfolgt über ein gelochtes Rohr (siehe Abb. 6). Nach den Beobachtungen kommt es zu guter Einmischung nach ca. 2 m in Strömungsrichtung.

Ergebnisse

Für die Auswertung wurde die Interrogation-Region von 80x80 (start), bzw. 40x40 (final) Pixel mit der recursive-Nyquiste-Engine genommen, was ein finales Integrationsfeld von ca. 8 mm x 8 mm beträgt. Mit $\Delta T = 2.0$ ms beträgt die Partikelverschiebung in der xy-Ebene ca. 15 %. Zur Erfassung der zeitlichen Entwicklung der Strömungen wurde die maximale Wiederholungsfrequenz des Nd:YAG-Lasers von 14.2 Hz eingestellt. Durch die derzeitige Hauptspeichergrenze von 2 GB konnten maximal 90 Bilder in der Gesamtlänge von ca. 6 s pro Messung aufgenommen werden.

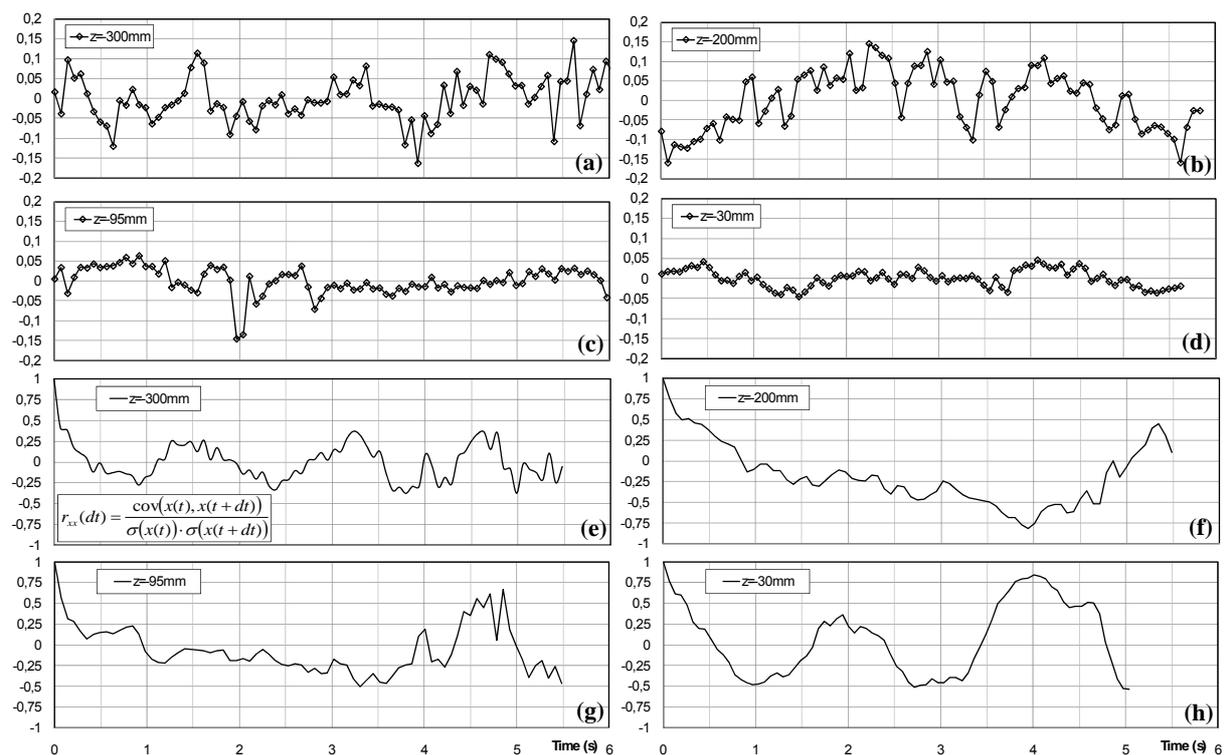


Abb. 7: Zeitliche Aufzeichnung der „interrogativen“ U-Geschwindigkeitskomponente (a-d) und derer Autokorrelation (e-h)

In der Abb. 7 wird die Zeitaufnahme der U-Geschwindigkeitskomponente in gewählten Punkten $x, y = (-100; 75)$ mm, $z = (-300; -200, -95, -30)$ mm wiedergegeben. Da die PIV-Messung in einem Interrogation-Spot erfolgt, wird die örtliche Turbulenz teilweise geglättet. Außer den restlichen stochastischen Schwankungen, ist aus den Diagrammen eine langperiodische Geschwindigkeitsschwankung erkennbar. Die Schwankungsperiode kann

ungefähr auf 4 Sekunden, bzw. 2 Sekunden aus der Autokorrelation (siehe Abb. 7 e-h) abgeschätzt werden.

Eine genauere Frequenzanalyse, sowie die richtige Erfassung der mittleren Größen, würde die Aufnahme über mehrere Perioden mit eingehaltener Messfrequenz erfordern. Die Option der Ensemble-PIV in Insight3G wurde auch getestet. In der Abb. 8 ist der Vergleich der gemittelten Geschwindigkeitsgrößen dargestellt. Das Ensemble-Ergebnis weist stärkere Gradienten mit einem neuen bedeutenden lokalen Maximum auf und im Vergleich zur Mittelung scheint das Geschwindigkeitsfeld ungeordnet zu sein. Die Problematik der richtigen Mittelung des beobachteten Strömungsphänomens, bzw. der dynamischen Analyse mithilfe PIV-Messung muss noch systematischer untersucht werden.

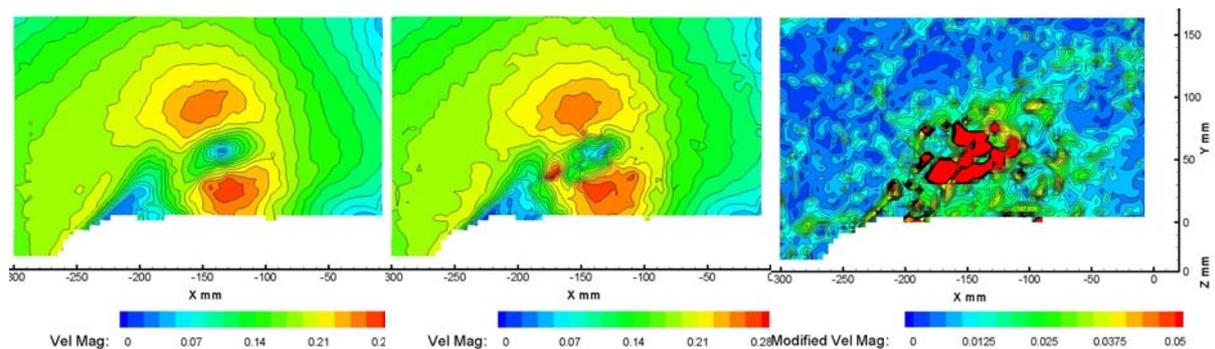


Abb. 8: Zeitlich gemittelte Geschwindigkeitsgröße ($z = -300$ mm): klassische Mittelung (links), Ensemble-PIV (mitten), Differenz (rechts)

In folgenden Abbildungen werden die durch „klassische“ PIV ermittelten Größen präsentiert. Die turbulente kinetische Energie wurde als $TKE = \frac{1}{2} (U_{Std}^2 + V_{Std}^2 + W_{Std}^2)$ bestimmt. Aus allen Darstellungsarten wird die Wirbelposition deutlich erkennbar.

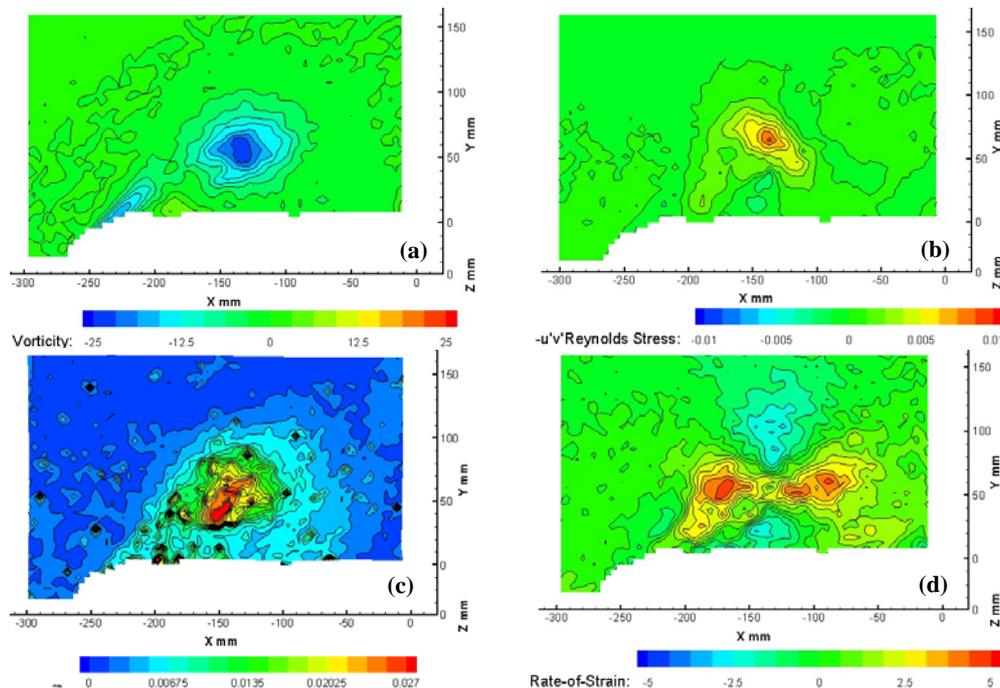


Abb. 9: Z-Vorticity (a), uv -Reynolds-Stress (b), TKE (c), Z-Verformungsgeschwindigkeit; Messebene $z = -300$ mm

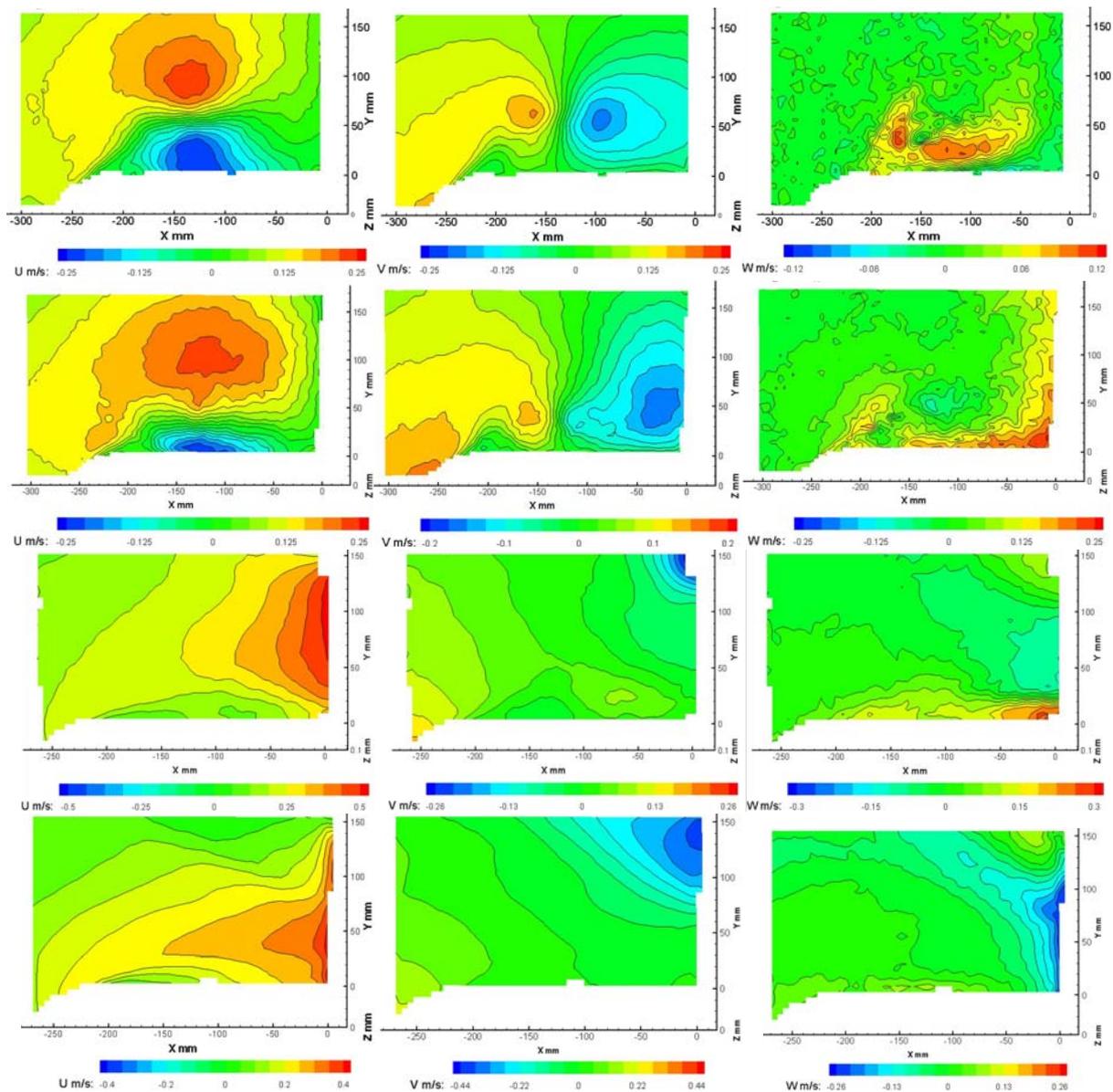


Abb. 10: Gemittelte U-, V-, W- Geschwindigkeitskomponenten, $z = (-300, -200, -95, -30)$ mm

Dankesworte

Für die Mithilfe bei der Durchführung und Auswertung der PIV-Messungen, danken wir Frau Corinne Bachelet, ENSTA Paris. Sie ist zurzeit Praktikantin am Institut.

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

Literatur

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

TSI: System- und Software-Dokumentation