

## 2D-PIV MESSUNG EINER STRÖMUNG MIT STARKER DRALLKOM- PONENTE IN EINEM GERADEN PUMPTURBINENSAUGROHR

### 2D-PIV MEASUREMENT OF A STRONG SWIRLING FLOW IN A STRAIGHT DRAFT TUBE OF A PUMP-TURBINE

**Oliver Kirschner, Albert Ruprecht**

Institut für Strömungsmechanik und Hydraulische Strömungsmaschinen  
Universität Stuttgart  
Pfaffenwaldring 10  
70550 Stuttgart  
e-mail: kirschner@ihs.uni-stuttgart.de, ruprecht@ihs.uni-stuttgart.de

Schlagworte: Pumpturbine, Saugrohr, Wirbelzopf  
Key words: pump-turbine, draft tube, vortex rope

#### **Zusammenfassung**

Das Saugrohr einer Wasserturbine hat die Aufgabe, kinetische Energie nach dem Laufrad in Druckenergie umzuwandeln. Dadurch wird nach dem Laufrad eine Absenkung des Drucks und folglich eine Steigerung der Fallhöhe am Laufrad erreicht. Dies ergibt dann letztendlich eine Steigerung der Leistung des Wasserkraftwerks. Bei Turbinen mit nichtverstellbaren Laufradschaufeln besitzt die Strömung im Saugrohr bei Off-Design-Betrieb nicht nur eine Transportkomponente, die proportional zum Durchfluss ist, sondern auch eine Drallkomponente.

Durch die starke Drallkomponente in manchen Betriebspunkten ist die Strömung in Turbinensaugrohren sehr komplex. Für die Validierung von numerischen Strömungssimulationen werden Geschwindigkeitsmessungen mit Particle Image Velocimetry (PIV) in einem vereinfachten geraden Diffusor durchgeführt. Dabei werden bei verschiedenen Betriebspunkten die Geschwindigkeiten in einer Symmetrieebene des Saugrohrs der Modellpumpturbine im Turbinenbetrieb erfasst. Je nach Betriebspunkt – in Teillast, Optimum und Volllast – treten unterschiedliche Strömungsformen im Saugrohr auf.

In einer früheren Arbeit wurde die phasenaufgelöste Messung der Geschwindigkeit in einem Teillastpunkt vorgestellt, siehe Kirschner 2006. Hier wird auf die Schwierigkeit bei der PIV-Messung mit Querströmung zur Messebene eingegangen. Zusätzlich werden die zeitlich gemittelten Messergebnisse sowie die unterschiedlichen Strömungsformen der verschiedenen Betriebspunkte dargestellt.

#### **Einleitung**

Seit der Liberalisierung des Strommarkts und wegen der steigenden Installation von Windenergie und anderen, nicht vorhersagbaren, erneuerbaren Energiequellen werden Pumpspeicherkraftwerke zunehmend zur Frequenzregelung des elektrischen Netzes eingesetzt. Dadurch werden diese Kraftwerke in den letzten Jahren verstärkt im Off-Design betrieben. Bei diesen Betriebsbedingungen kann im Saugrohr ein Wirbelzopf entstehen. Der Wirbelzopf ist ein mit ca. einem Drittel der Laufraddrehzahl umlaufender spiralförmiger Wirbel.

## 34.2

Der steigende Off-Designbetrieb ist ein Grund für das große Interesse an der Vorhersage und der Vermeidung des Wirbelzopfphänomens in Saugrohren von Wasserturbinen. Durch die schnelle Computerentwicklung der letzten Jahre wurde die numerische Berechnung von Strömungsphänomenen wie dem Saugrohrwirbelzopf möglich. Bisherige Simulationen zeigen, dass komplexe Modelle notwendig sind, um die auftretenden Phänomene korrekt zu beschreiben. Die Simulationsergebnisse mit neuen Modellen, wie beispielsweise VLES, sind vielversprechend. Für weitere Untersuchungen sind Vergleiche mit detaillierten Messungen notwendig, siehe Ruprecht et al 2002. Es gibt jedoch nur wenige detaillierte experimentelle Untersuchungen der Strömungsgeschwindigkeit mit laseroptischen Methoden. Eine aufwendige Untersuchung mit 3D-PIV und LDA wurde im Rahmen des FLIND Projektes an einem Ellenbogensaugrohr durchgeführt, siehe Avellan 2000, Iliescu et al 2002 und 2003 und Cioacan et al 2004. In einem Ellenbogensaugrohr wurde für die Turbine-99 Workshops die Geschwindigkeit mit LDA gemessen, siehe Anderson 2000 und Lövgren 2006. An weiteren Ellenbogensaugrohren wurden phasenaufgelöste LDA Messungen durchgeführt, siehe Vekve et al 2002, Vekve 2004 und Skotak 1999, 2000 und 2001. Alle diese Messungen haben gemeinsam, dass sie in konventionellen Saugrohren mit Ellenbogen durchgeführt wurden. In der hier vorgestellten Untersuchung wird, um die Komplexität des Strömungsfelds zu reduzieren, ein vereinfachter Testfall mit einem geraden Saugrohr verwendet.

### Versuchsaufkreislauf mit Model-Pumpturbine

Der Pumpturbinenversuchsstand ist in den großen geschlossenen Kreislauf des Institutslabors eingebaut. Zwei durch einen drehzahlgeregelten Gleichstrommotor angetriebene und in Reihe geschaltete Kreiselpumpen fördern Wasser in den Oberwasserbehälter.

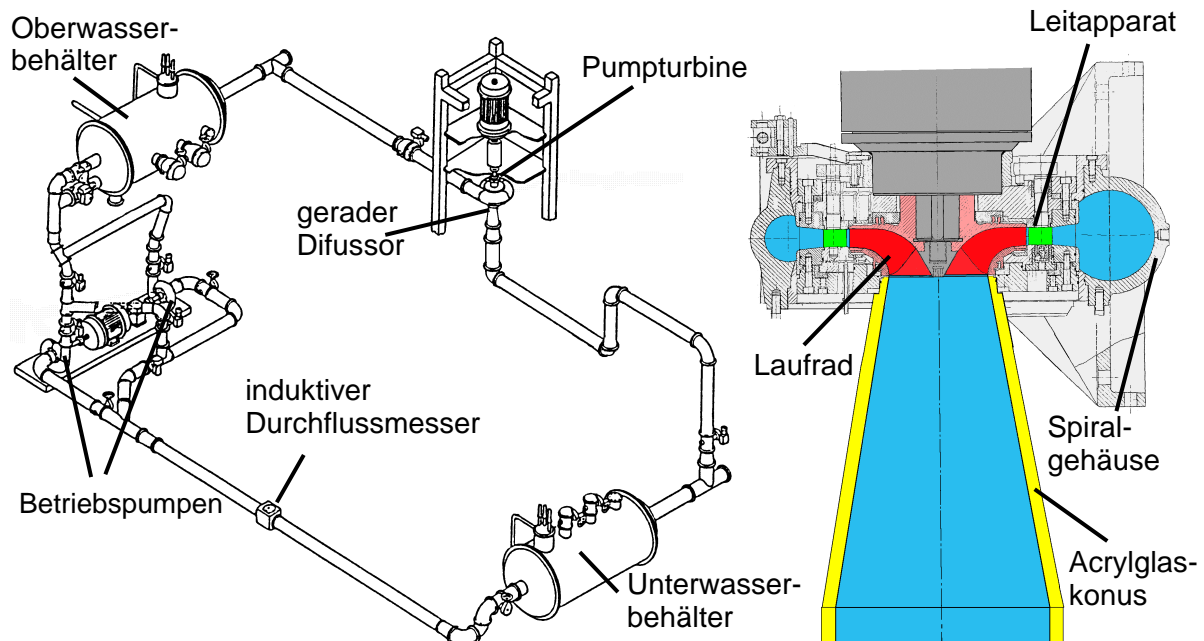


Abb. 1: Versuchskreislauf und Schnitt der Pumperturbine

Vom Oberwasserbehälter strömt das Wasser durch eine Leitung zum Pumperturbinenmodell. Die Pumperturbine ist mit einem drehzahlgeregelten Motorgenerator ausgeführt. Als Saugrohr ist ein gerader Konus in die Pumperturbine eingebaut. Nach dem Konus ist eine gerade Rohrleitung mit einem Nenndurchmesser von 400 mm und einer Länge von ca. 2,4 m montiert. Von dort aus wird das Wasser in den Unterwasserbehälter geleitet und fließt danach durch einen magnetisch induktiven Durchflussmesser zurück zu den Pumpen (siehe Abb. 1 links).

Der Unterwasserbehälter ist mit einem luftbeaufschlagten Dom ausgeführt, um das Druckniveau im Kreislauf variabel einstellen zu können.

In Abb. 1 ist rechts ein Längsschnitt durch die Pumpturbine zu sehen. Das Wasser wird mit Hilfe des Spiralgehäuses nahezu gleichmäßig über den Umfang verteilt. Vom Spiralgehäuse strömt das Wasser radial durch den verstellbaren Leitapparat zum Laufrad. Das Laufrad mit sieben doppeltgekrümmten Schaufeln lenkt das Wasser um, so dass es das Laufrad axial zum Saugrohr verlässt. Der gerade Diffusor ist aus transparentem Acrylglas gefertigt, um die Zugänglichkeit für die laseroptischen Messverfahren zu gewährleisten. Der gerade Diffusor hat einen Öffnungswinkel von  $2 \times 10^\circ$ , einen Eintrittsdurchmesser von 182 mm und einen Austrittsdurchmesser von 400 mm.

### Durchführung und Auswertung der Messungen

Für die Messungen wird ein PIV-System des Herstellers TSI eingesetzt. Das PIV-System besteht aus einem doppeltgepulsten Nd:YAG-Laser (TSI Model Y25-20 MiniLase II, Hersteller: New Wave Research) mit 25 mJ pro Puls und einer maximalen Wiederholungsrate von 20 Hz sowie einer CCD-Kamera (PIVCam 13-8) mit einer Auflösung von 12 Bit und  $1280 \times 1024$  Pixel<sup>2</sup> bei einer Bildwiederholrate von 8 Hz. Diese werden mit Hilfe eines Synchronizer (Model 610032) und eines PC mit der Software Insight PIV der Version 6.1.1.0 gesteuert. Als Seeding werden Polyamidpartikel der Dichte von  $1,016 \text{ g/cm}^3$  bei  $23^\circ\text{C}$  mit einer nahezu runden Kornform und einer mittleren Korngröße von  $90 \mu\text{m}$  eingesetzt.

Die Auswertung der Messung erfolgt über Kreuzkorrelation mit einem Auswertefenster von  $64 \times 64$  Pixel<sup>2</sup> bei 50% Überlappung. Die Zeit zwischen zwei Belichtungen liegt je nach Betriebspunkt zwischen  $60 \mu\text{s}$  und  $140 \mu\text{s}$ . Die Filtereinstellungen werden ebenfalls an den jeweiligen Betriebspunkt angepasst. Bei der zeitgemittelten Messung werden mindestens 20000 Vektorfelder für jede Kameraposition gemittelt.

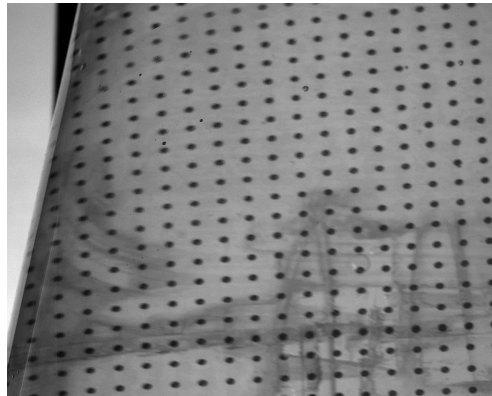


Abb. 2: Aufnahme des Kalibrierrasters für eine Kameraposition

Durch den experimentellen Aufbau mit der konischen Form des Saugrohrs und den damit verbundenen unterschiedlichen Brechungswinkeln, ist eine optische Kalibrierung des Systems notwendig. Die Kalibrierung erfolgt mit einem Raster aus schwarzen Punkten, das sich auf einem Acrylglaträger befindet. Die Punkte besitzen einen Durchmesser von 2 mm mit einer Rasterweite von 6,5 mm. Dieses Raster wird vor den Messungen in den jeweiligen Messebenen positioniert und mit der Kamera des PIV Systems erfasst (siehe Abb. 2). Während der Kalibrierung befindet sich die Kamera genau an derselben Position, wie später bei der Messung. In einem ersten Schritt werden die Positionen der Punkte des Kalibrierrasters auf dem verzerrten Abbild bestimmt. Ein selbstgeschriebenes Programm ermöglicht

# 34.4

die Korrektur der Position und der Größe der Geschwindigkeitsvektoren mit einer Transformationsmatrix. Die einzelnen Einträge in der Matrix werden durch bi-lineare Interpolation in Abhängigkeit des Ortes erzeugt. Neben der Positioniergenauigkeit der Kamera und der Interpolationsfehler, bzw. der Entzerrung, liefert die Auswertung mit der Kreuzkorrelation eine weitere Fehlerquelle. Ferner wird noch ein Effekt nicht betrachtet: Da die Abbildungen der Streulichtteilchen nicht, wie oft vereinfachend angenommen, eine Parallelprojektion, sondern eine Perspektivprojektion der Partikel sind, wird in der stark dreidimensionalen Strömung die Messung der zwei innerhalb der Lichtschnittebene liegenden Komponenten der Geschwindigkeit, durch die Querkomponente zur Belichtungsebene, mit einem systematischen Fehler verfälscht, siehe Raffel et al 1995. In Abb. 3 ist dieser Effekt schematisch dargestellt. Wenn sich ein Partikel zwischen den zwei Belichtungszeiten senkrecht zum Lichtschnitt bewegt, wird durch den Betrachtungswinkel eine Partikelverschiebung in der Lichtschnittebene ermittelt. Um diesen Fehler bei der Messung zu umgehen, wird zu der ersten zweidimensionalen PIV-Messung ein zweite Messung durchgeführt. Bei der zweiten Messung ist die Position der Kamera spiegelsymmetrisch zur der Messebene aufgebaut (im Vergleich zur ersten Messung), siehe Abb. 3. Bei dieser zweiten Messung besitzt der Fehler das negative Vorzeichen der ersten Messung. Durch die Mittelung der zwei Messungen kann so der, durch die Partikelquerbewegung entstehende, Fehler bei den Geschwindigkeiten in der Messebene deutlich reduziert werden.

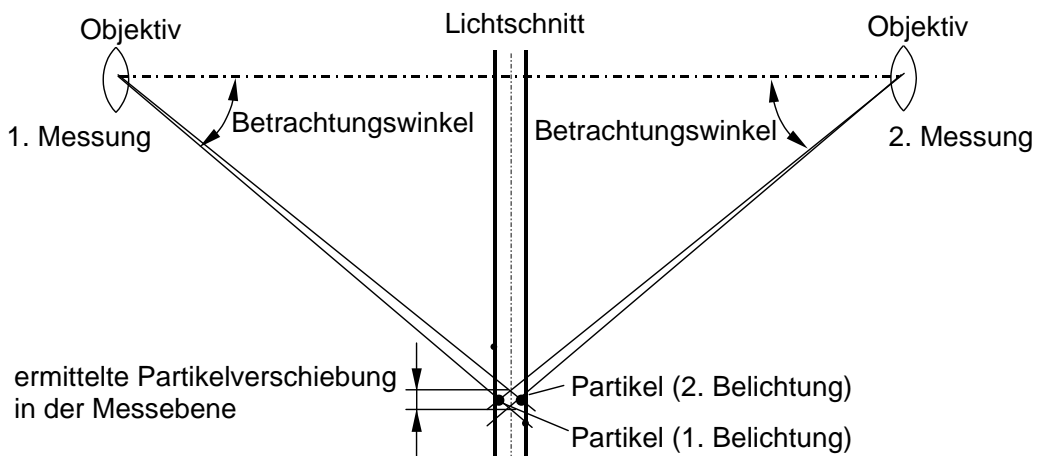


Abb. 3: Einfluss der Querbewegung auf die Berechnung der Partikelverschiebung

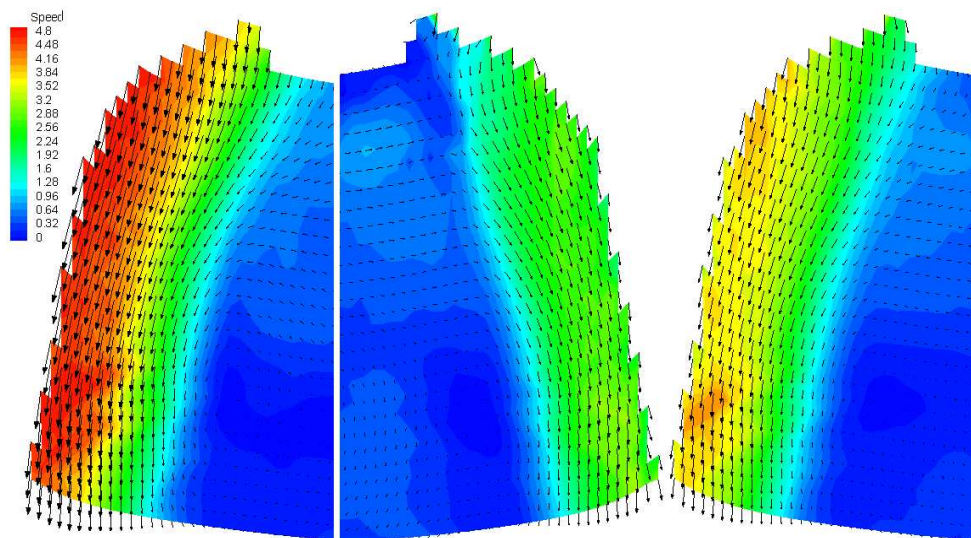


Abb. 4: Geschwindigkeitsfeld im Teillastbetriebspunkt Nr. 4 ( $Q/Q_{opt}=0,72$ ;  $P/P_{opt}=0,69$ ;  $n=n_{opt}$ )

Die Ergebnisse der oben beschriebenen Fehlerkorrektur durch Mittelung der Ergebnisse der beiden Kamerapositionen sind in Abb. 4 und Abb. 5 für zwei Betriebspunkte aufgeführt. Es sind jeweils die Geschwindigkeitsfelder der zwei gespiegelten Positionen (linkes und mittleres Bild) und das gemittelte Geschwindigkeitsfeld (rechtes Bild) dargestellt. Wie zu erkennen ist, hängt der Unterschied zwischen den Geschwindigkeitsfeldern der zwei gespiegelten Positionen von der Stärke des Dralls im jeweiligen Betriebspunkt ab. In Abb. 4 ist die Fehlerkorrektur in einem Betriebspunkt (Nr. 4) mit einer stark drallbehafteten Strömung dargestellt. Für Betriebspunkte mit starkem Drall unterscheiden sich die Geschwindigkeitsfelder der gespiegelten Kamerapositionen beträchtlich (vgl. Abb. 4). In Abb. 5 ist die Fehlerkorrektur für das Optimum, mit einer nahezu drallfreien Strömung, dargestellt. Im Optimum sind die Unterschiede in den Geschwindigkeitsfeldern der gespiegelten Kamerapositionen gering.

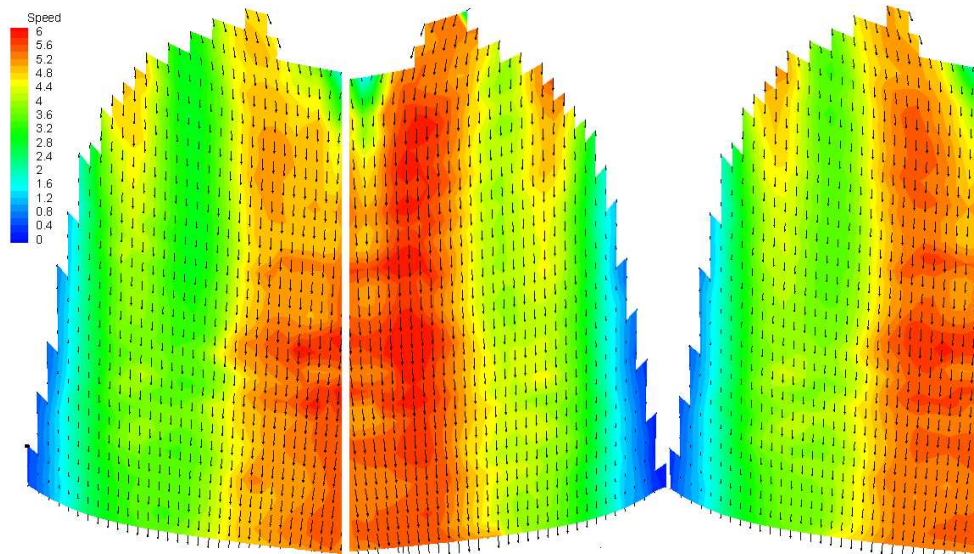


Abb. 5: Geschwindigkeitsfeld im Optimum Nr. ( $Q=Q_{opt}$ ;  $P=P_{opt}$ ;  $n=n_{opt}$ )

In Abb. 6 ist die mittlere Differenz des aus der Axialgeschwindigkeit der PIV-Messung integrierten Durchflusses bezogen auf den Durchfluss, der mit einem magnetisch induktiven Durchflussmesser bestimmt wurde, dargestellt. Ein Grund für die Abweichungen zwischen dem gemessenen und dem berechneten Durchfluss ist, dass die Geschwindigkeiten nahe der Wand nicht erfasst werden konnten.

In Abb. 6 sind die Abweichungen von zwei extremen und einer wahrscheinlicheren Variante der Berechnung des Durchflusses dargestellt. In der ersten Variante (ohne Extrapolation) sind die nicht erfassten Werte zu Null gesetzt. Folglich wird, besonders für Betriebspunkte mit starker Drallströmung, bei denen eine höhere Axialgeschwindigkeit an der Wand herrscht, ein zu geringer Durchfluss berechnet. Beim Betriebspunkt Nr. 6 und im Optimum kann es jedoch sein, dass durch die Ablösung im Randbereich und der damit verbundenen Rückströmung ein zu großer Wert ermittelt wird. Bei der zweiten Variante (Extrapolation mit logarithmischem Wandgesetz) werden die durch die PIV-Messung nicht erfassten Werte bis zur Saugrohrwand durch das logarithmische Wandgesetz extrapoliert. Da die Geschwindigkeitsgradienten in der Strömung an der Schnittstelle zur Extrapolation steiler verlaufen, als im Profil des logarithmischen Wandgesetzes, wird der Durchfluss damit eher zu hoch berechnet. Als wahrscheinlichere Variante (quadratische Extrapolation) wird ein Polynom 2. Ordnung mit den Randbedingungen der letzten gemessenen Geschwindigkeit, inklusive dem Geschwindigkeitsgradienten und der Haftbedingung an der Wand angesetzt. Bei dieser Variante ergeben sich in allen Betriebspunkten sinnvolle, glatte Verläufe der Geschwindigkeit. Die mittlere Abweichung des integrierten Durchflusses zu dem Durchfluss, der mit dem induktiven Durchflussmesser bestimmt wurde, liegt in allen Betriebspunkten unter 3%.



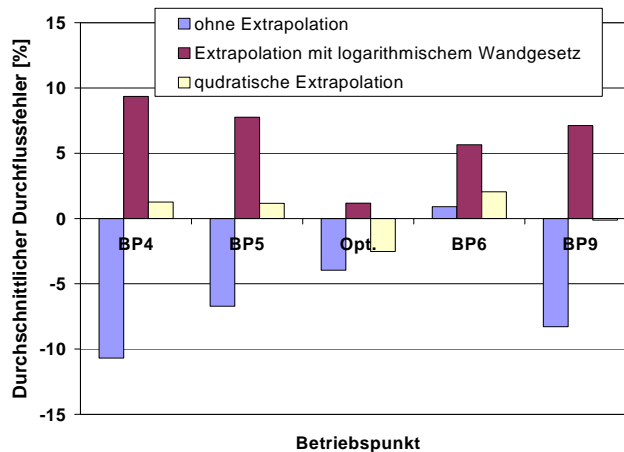


Abb. 6: Abweichung des aus der Geschwindigkeit integrierten zum gemessenen Durchfluss

### Messergebnisse

In Abb. 7 bis Abb. 10 sind die visualisierten Wirbelzopfformen und die gemittelten Geschwindigkeitsfelder für vier verschiedene Betriebspunkte dargestellt. Die Visualisierung erfolgt durch Kavitation im Wirbelkern, dabei wird die Kavitation durch Absenken des Druckniveaus im Kreislaufs erzeugt.

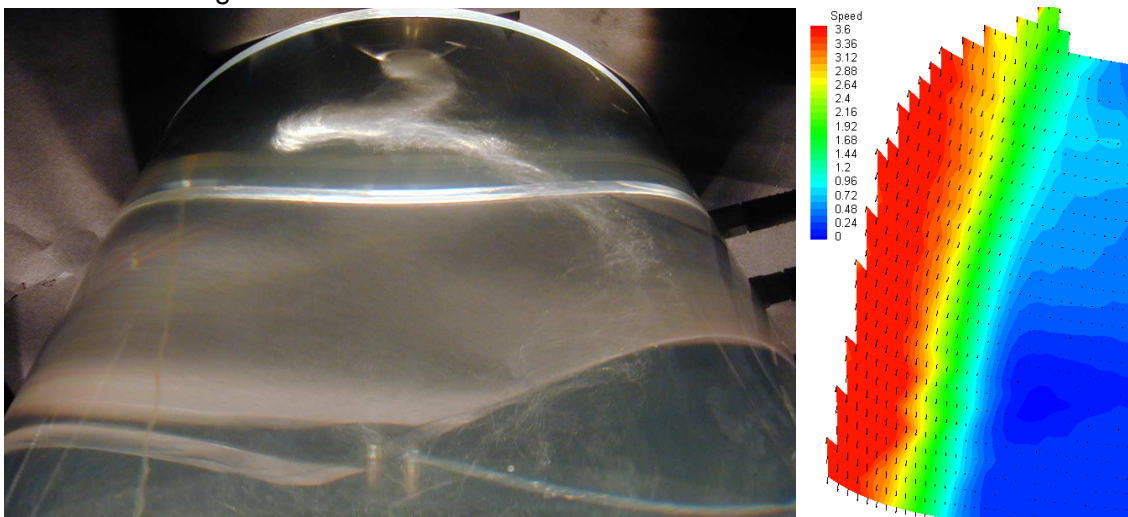


Abb. 7: Teillastbetriebspunkt Nr. 4 ( $Q/Q_{\text{Opt}}=0,72$ ;  $P/P_{\text{Opt}}=0,69$ ;  $n=n_{\text{opt}}$ )

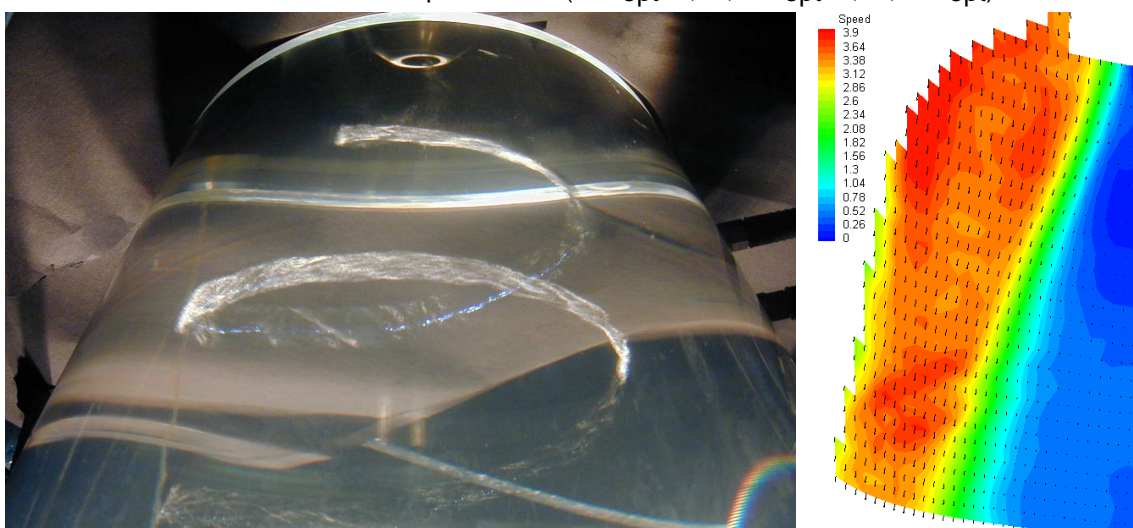


Abb. 8: Teillastbetriebspunkt Nr. 5 ( $Q/Q_{\text{Opt}}=0,83$ ;  $P/P_{\text{Opt}}=0,82$ ;  $n=n_{\text{opt}}$ )

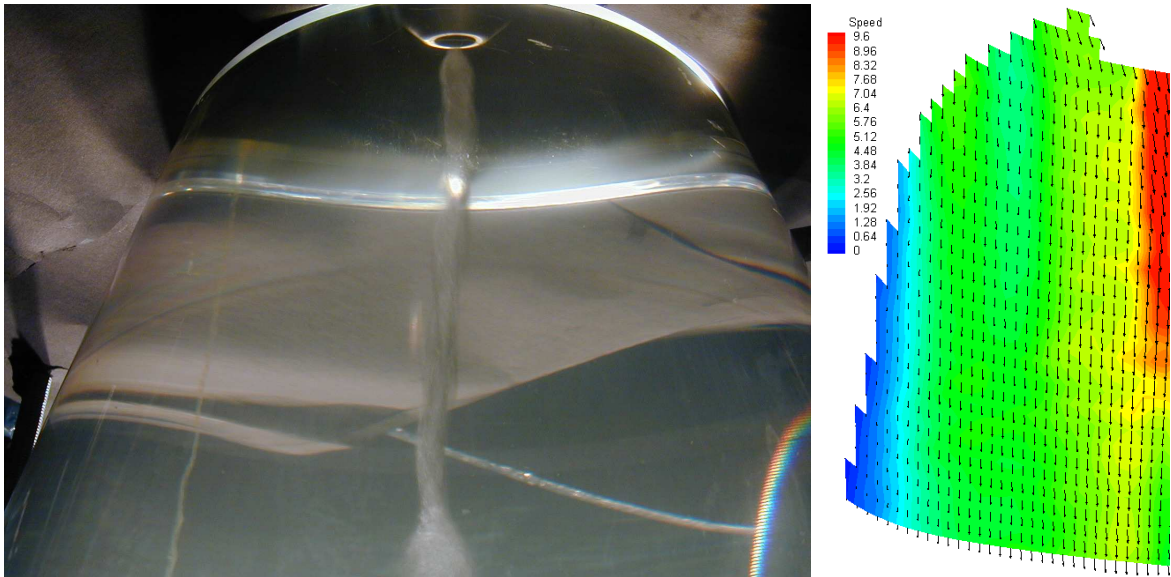


Abb. 9: Volllastbetriebspunkt Nr. 6 ( $Q/Q_{opt}=1,11$ ;  $P/P_{opt}=1,10$ ;  $n=n_{opt}$ )

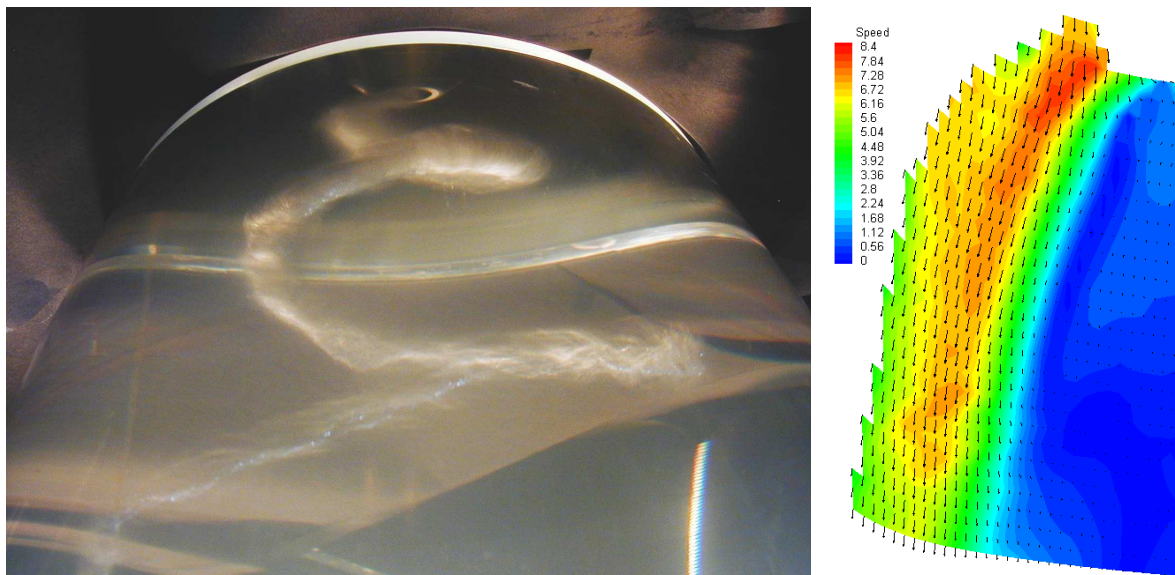


Abb. 10: Überlastbetriebspunkt Nr. 9 ( $Q/Q_{opt}=1,35$ ;  $P/P_{opt}=1,29$ ;  $n=n_{opt}$ )

In Abb. 7 bis Abb. 10 sind in den Klammern die Daten des jeweiligen Betriebspunkts in Bezug auf das Optimum angegeben. In den ersten beiden Bildern sind umlaufende Teillastwirbelzöpfe zu sehen. In dem dritten Bild ist ein zentraler Volllastwirbelzopf abgebildet. Der Überlastwirbelzopf, der im vierten Bild dargestellt ist, hat im Vergleich zu den Teillastzöpfen die umgekehrte Krümmung und Umlaufrichtung. Dies ist bedingt durch die geänderte Drallrichtung bei starker Überlast. In den Geschwindigkeitsverteilungen ist bei den Betriebspunkten mit umlaufenden Wirbelzöpfen die für diese Betriebspunkte charakteristische niedrige Transportgeschwindigkeit entlang der Symmetrieachse zu sehen.

### Zusammenfassung

Für fünf Betriebspunkte wurden Geschwindigkeitsmessungen mit Particle Image Velocimetry in einem geraden Saugrohr einer Pumpturbine durchgeführt. Für diese Betriebspunkte werden die zeitlich gemittelten Axial- und Radialkomponenten der Geschwindigkeit präsentiert. Es wird die Möglichkeit einer Korrektur des systematischen Fehlers infolge der Querbewegung der Partikel zur Lichtschnittebene vorgestellt und experimentell umgesetzt. Die so korrigierten Messergebnisse liefern im Vergleich mit dem gemessenen Werten von nur einer

Kameraposition, deutlich bessere Werte hinsichtlich des Durchflusses. Für die Integration des Durchflusses wird die fehlende Geschwindigkeitsinformation in der Nähe der Wand mit einem Polynom 2. Ordnung angenommen, da sich dadurch sinnvolle, glatte Geschwindigkeitsprofile ergeben. Mit dieser Annahme liegen die mittlere Abweichungen für alle Betriebspunkte unter 3%.

### Dankesworte

Das Projekt, das dieser Veröffentlichung zu Grunde liegt, wurde durch Voith Siemens Hydro Power Generation GmbH & Co. KG und die Stiftung Energieforschung Baden Württemberg finanziert.

### Literatur

- Andersson U., 2000: "An Experimental Study of the Flow in a Sharp-Heel Draft Tube", Licentiate Theses, Department of Mechanical Engineering, Division of Fluid Mechanics, Luleå University, Luleå, Sweden, 2000.
- Avellan F., 2000 "Flow Investigation in a Francis Draft Tube: The Flindt Project", in Proceedings of Hydraulic Machinery and System 20<sup>th</sup> IAHR Symposium, Charlotte, North Carolina 6-9 August 2000.
- Ciocan G.D., Avellan F., 2004: "Flow Investigation in a Francis Draft Tube: Advanced Experimental Methods", in Proceedings of the 3<sup>rd</sup> Conference of Romanian Hydropower Engineers, Bucharest, Romania, Mai 28-29, 2004
- Iliescu M.S., Ciocan G.D., Avellan F., 2003: "2 Phase PIV Measurements at the Runner Outlet in a Francis Turbine", in Proceedings of ASME FEDSM'03, 4<sup>th</sup> ASME\_JSME Joint Fluids Engineering Conference, Honolulu, Hawaii, USA, July 6-10, 2003
- Iliescu M.S., Ciocan G.D., Avellan F., 2002 "3D PIV and LDV Measurements at the Outlet of a Francis Turbine Draft Tube", in Proceedings of ASME FEDSM'02, The 2002 Joint US ASME-European Fluids Engineering Summer Conference, July 14-18, 2002, Montreal, Quebec, Canada
- Kirschner O., 2006: "PIV Geschwindigkeitsmessung im geraden Saugrohr einer Modell-Pumpturbine" Fachtagung "Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik", Braunschweig, Germany, 5. – 7. September 2006.
- Lövgren H. M., 2006: "Time Dependent Pressure Phenomena in Hydropower Applications", Licentiate Theses, Department of Applied Physics and Mechanical Engineering, Division of Fluid Mechanics, Luleå University, Luleå, Sweden, 2006.
- Raffel M., Kompenhans J., 1995: "Anwendung der Particle Image Velocimetry in stark dreidimensionalen Strömungen" Beitrag zu Lasermethoden in der Strömungsmechanik, 4. Fachtagung GALA e.V., Rostock, 12.-14. September, 1995.
- Ruprecht A., Helmrich Th., Aschenbrenner Th., Scherer Th., 2002: "Simulation of Vortex Rope in a Turbine Draft Tube", in Proceedings of the Hydraulic Machinery and Systems 21st IAHR Symposium, Lausanne, September 9-12.
- Skoták A., 1999: "Draft Tube Swirl Flow Modelling", IAHR 9th International Meeting of the Work Group on "The Behaviour of Hydraulic Machinery under Steady Oscillatory Conditions", Brno, Czech Republic, 7.-9. September 1999.
- Skoták A., 2000: "Of the Helical Vortex in the Turbine Draft Tube Modelling", in Proceedings of Hydraulic Machinery and System 20th IAHR Symposium, Charlotte, North Carolina 6-9 August 2000.
- Skoták A., Mikulasek J., Troubil P., 2001: "Unsteady Flow in a Draft Tube with Elbow Part A – Experimental Investigation", IAHR 10th International Meeting of the Work Group on "The Behaviour of Hydraulic Machinery under Steady Oscillatory Conditions", Trondheim, 26.-28. June 2001.
- Vekve T., Skåre P. E., 2002: "Velocity- and Pressure Measurement in the Draft Tube on a Model Francis Pump Turbine", in Proceedings of the Hydraulic Machinery and Systems 21<sup>st</sup> IAHR Symposium, Lausanne, September 9-12, 2002.
- Vekve T., 2004: "An Experimental Investigation of Draft Tube Flow", Doctoral Theses 2004:36 at Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, 2004