

PIV als experimentelle Methode für die Erklärung der S-Schlag Instabilität von Pumpturbinen

PIV as an experimental method to explain the S-shape instability of pump turbines

Florian Senn, Mark Guggenberger, Jürgen Schiffer, Helmut Jaberg

Institut für Hydraulische Strömungsmaschinen
Kopernikusgasse 24/IV
A-8010 Graz
Österreich

Pumpturbine, S-Schlag, Rotor-Stator Interaktion, Hydraulische Maschinen, Durchbrennen
pump turbine, s-shape, rotor-stator interaction, hydraulic machines, no-load operation

Zusammenfassung

Die Arbeit beschäftigt sich mit typischen Problemen der hydraulischen Strömungsmaschinen. Üblicherweise werden diese Wasserkraftmaschinen experimentell in Form von Modellen in Laboratorien untersucht. Heutzutage wird immer noch jede neue hydraulische Maschine vor dem Einsatz im Kraftwerk experimentell erprobt. In Abbildung 1 ist das im Zuge dieser Arbeit verwendete Modell dargestellt. Dieses Modell verfügt über die typischen strömungstechnischen Baugruppen einer hydraulischen Maschine wie Spirale, Stützschaufeln, Leitschaufeln und Laufrad. Bei Pumpturbinen, welche durch Drehrichtungsumkehr entweder als Pumpe oder auch als Turbine funktionieren, wurde in den letzten Jahrzehnten immer wieder Fälle bekannt, bei denen Probleme beim Anfahren der Maschinen und der damit verbundenen Netzsynchonisierung auftreten. Die Probleme basieren auf einer Instabilität, welche in den Kennlinien die Form eines S-Schlag bewirkt, daher wird diese in der Literatur und Normung häufig als S-Schlag-Instabilität bezeichnet.

In einem ersten Schritt wurde das Modell auf dem Prüfstand des Instituts aufgebaut und modifiziert um die Beobachtung der Strömung – ohne Veränderung des Strömungsraums – zu ermöglichen. Hierzu wurden optische Zugänge in das Modell integriert, so dass ein PIV-System eingesetzt werden konnte. Für die Untersuchung wurde dieses System auf eine Laufrad Position mithilfe eines Trigger Signals synchronisiert. Der Laser und die Kamera wurden so angeordnet, dass die Lichtschnittebene entweder tangential oder axial zur Laufradachse verläuft. Um eine hinreichende Anzahl von Aufnahmen zu erhalten wurde ein Laufradkanal mit einem Phasenversatz von 2° und jeweils 190 Einzelaufnahmen erfasst. Um unterschiedliche Betriebsbereiche miteinander vergleichen zu können wurde diese Prozedur für über 20 repräsentative Betriebspunkte in vier verschiedenen Lichtschnittpositionen sowie an zwei verschiedenen Laufrädern durchgeführt. Mit Hilfe der Kreuzkorrelation wurden die von der Kamera erzeugten Doppelbilder ausgewertet.

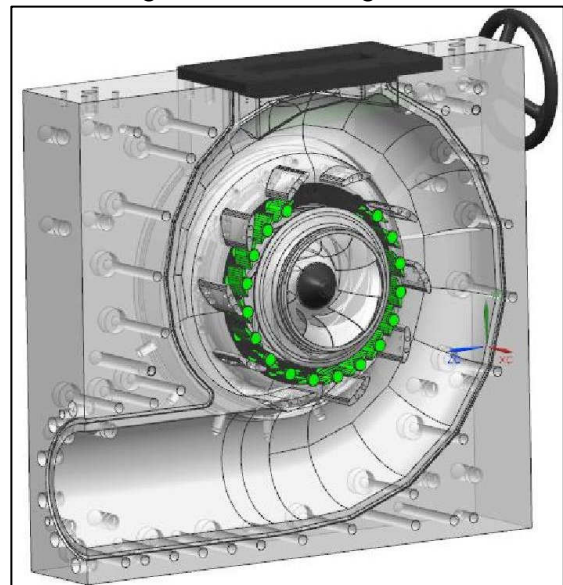


Abb. 1: Neukonstruktion des Spiralgehäuses

Die hieraus resultierenden 400.000 Vektorfelder wurden in ein separat eigens aus Strömungsmaschinen optimiertes MATLAB Programm importiert und damit eine detaillierte Auswertung des Versuchs und ein direkter Vergleich mit numerischen Berechnungen ermöglicht. Da der Versuchsaufbau konform zur Abnahmenorm IEC 60193 aufgebaut wurde, wird nun auch eine direkte Validierung von vorhandenen numerischen Ergebnissen ermöglicht und damit die Basis für eine Weiterentwicklung der Norm gelegt.

Einleitung

Durch den Atomausstieg und den wachsenden Anteil an elektrischen Energiegewinnen aus erneuerbaren Ressourcen benötigt das Stromnetz in Mitteleuropa eine stärkere Regulierung seines Energiegleichgewichts. Pumpturbinen spielen durch ihre kurzen Ein- bzw. Ausschaltzeiten (Lade- bzw. Entladevorgänge des Speichers) sowie Umschaltzeiten vom Pump- in den Turbinenbetrieb dabei eine wichtige Rolle und bieten wesentliche Vorteile um kurzfristig auf die Erfordernisse des Verteilernetzes reagieren zu können. Jedoch treten bei Pumpturbinen während des Synchronisationsvorgangs in den Turbinenbetrieb oft Stabilitätsprobleme auf, welche in der Form der Maschinencharakteristik zu einem so genannten „S-Schlag“ führen und den Prozess der Synchronisation verlangsamen oder ihn gar unmöglich machen. Kostspielige Nachbesserungen am Kraftwerk oder reduzierte Einsatzbereiche der Pumpturbinen sind die Folge. Erste CFD-Simulationen des S-Schlags zeigten, dass sich im Betriebsbereich des S-Schlags eine Wirbelstruktur bildet, welche sich entgegen der eigentlichen Strömungsrichtung und des Druckgradienten ausbreitet, siehe T. Staubli, F.Senn, M. Salla-berger, 2008. Die damit verbundene Rezirkulation im Bereich des Laufradeintritts stellt eine Möglichkeit dar, die Physik des Strömungsfeldes im S-Schlag zu erklären. Die S-Schlag Instabilität besitzt hierbei noch lokalen Charakter und tritt nur bei rotationssymmetrisch geöffnetem Leitapparat auf. Eine der möglichen Abhilfemaßnahmen ist das separate Auslenken von mehreren Leitschaufeln, welche aus dem Verband herausgedreht werden. Alternativ kann durch das Erhöhen des Anlagen-, bzw. Prüfstand-Verlusts mit Hilfe eines vorgeschalteten, regelbaren Ventils die S-Schlag-Instabilität umgangen werden, wie von Peter Dörfler 1998 gezeigt.

Prüfstandsaufbau

Die untersuchte Modell-Pumpturbine wurde in einen geschlossenen Prüfstand integriert, welcher einen Gesamtvolumen von ca. 15 m³ aufweist. Der statische Druck ist vom Umgebungsniveau entkoppelt und die Antriebsleistung der Hauptpumpe beträgt 500 kW. Der Prüfling und der mit einer Druckregelung ausgestattete Unterwasserbehälter sind ca. 15 m über dem Niveau der Hauptpumpe aufgebaut. Ein in die Rohrleitung integrierter Energiedissipator dient dazu die Verlustcharakteristik des Prüfstandes zu verändern und alle Bereiche der Pumpturbine stationär zu vermessen. Zusätzlich kann das Pumpturbinen-Modell im Pumpbetrieb mit abgekoppelter Hauptprüfstandspumpe betrieben werden. Hierzu ist ein Bypass an der Hauptpumpe ange-

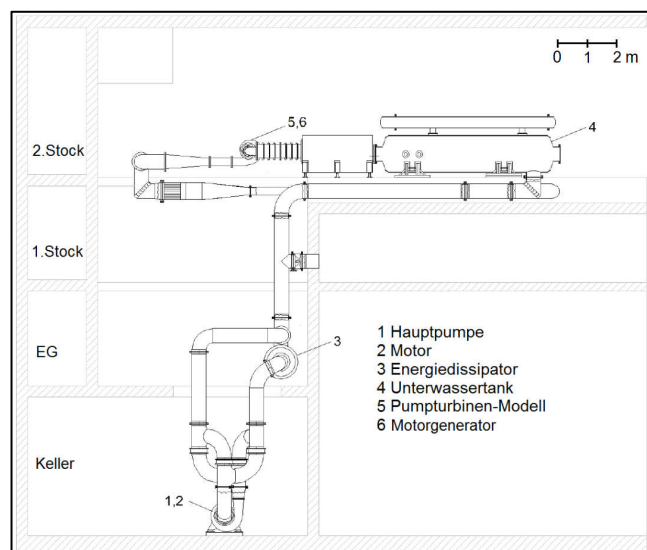


Abb. 2: Prüfstandsaufbau

Hierzu ist ein Bypass an der Hauptpumpe ange-

bracht. Die Modell-Pumpturbine wurde mit einem 200 kW Motorgenerator und einem rückspeisefähigen Frequenzumrichter in die elektrische Stromversorgung integriert. Der in Abbildung 2 dargestellte Aufriss beziffert und beschreibt die Hauptkomponenten.

Versuchsaufbau

Das Spiralgehäuse und weitere das Pumperturbinen-Laufrad umgebende Teile mussten angepasst werden um die optische Zugänglichkeit zu schaffen ohne die durchströmte Geometrie zu verändern und die Leit- bzw. Stützschaufeln zu erhalten. Dadurch konnte die Einhaltung der Norm für Abnahmeversuche IEC 60193:1991 gewährleistet werden. Eine Neukonstruktion des Spiralgehäuses ermöglichte einen axialen und radialen Zugang, um die Lichtschnittebene orthogonal zur Kameraachse zu orientieren.

Die axiale Blickrichtung erlaubte die Beobachtung des Geschwindigkeitsfeldes in einer Ebene normal zur Rotationsachse des Laufrades, die radiale Blickrichtung erlaubte die Beobachtung der Geschwindigkeitsverteilung in einer Ebene normal zu einer Tangente auf den äußeren Radius des Laufrades (Abb. 3). Das Spiralgehäuse besteht aus zwei Aluhalbschalen und einem radialen Beobachtungsfenster, welches in der Form

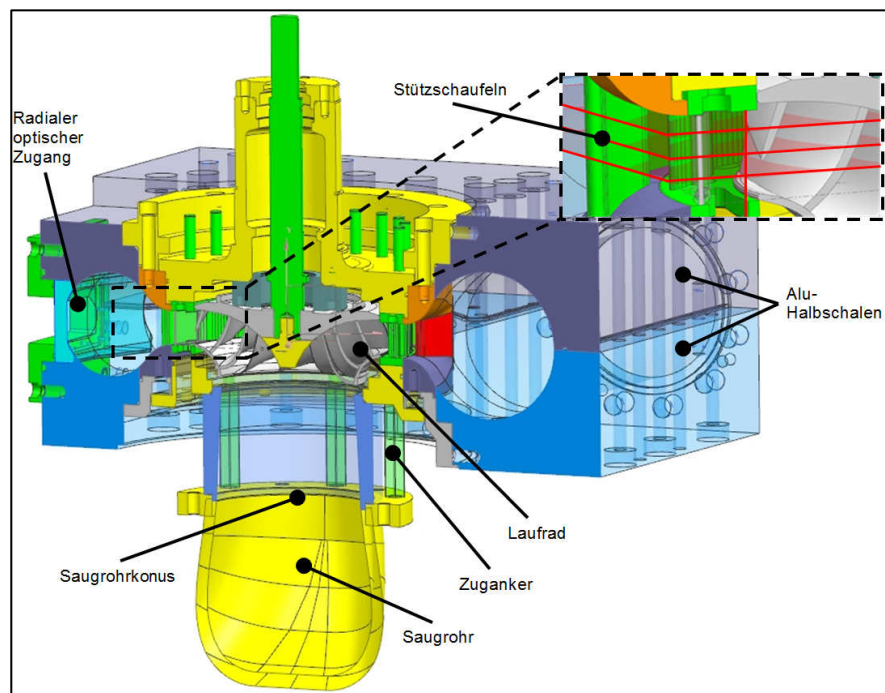


Abb. 3: Schnitt durch das Pumperturbinen-Modell

der Innenkontur der Spirale gefertigt wurde. Dieses Fenster wurde mit einer rasch lösbaren Rahmenkonstruktion in den Alu-Block integriert. Um einen uneingeschränkten optischen Zugang aus radialer Richtung in den Bereich zwischen Leit- und Laufschaufeln zu schaffen wurde der Leitapparat so modifiziert, dass zwei der 20 Leitschaufeln transparent gestaltet wurden. Um den axialen Zugang zu gewährleisten wurde ein zusätzliches Fenster in den Stützring des Modells integriert. Hierbei wurde darauf geachtet, dass die bei einem hydraulischen Modell üblicherweise verstellbaren Leitschaufeln, auch während der Versuche einstellbar sind. Beide optischen Zugänge und die transparenten Leitschaufeln wurden aus Acrylglas gefertigt, was ein guter Kompromiss zwischen Kosten und Fertigungsaufwand war. Um zusätzlich ungewollte Streuungseffekte im Modellaufbau zu verringern wurde das zweiteilige Aluminiumgehäuse schwarz eloxiert und der Bereich des Laufrades, der mit PIV untersucht wurde, mittels rotem Permanent Marker beschichtet, was zu einer Reduzierung des diffusen Lichtanteils im Bildhintergrund führte und so die Qualität der Aufnahmen verbesserte.

Als Kamerasystem kam eine Double Frame Kamera Typ DANTEC 80C60 HiSense mit 1280x1024 Pixel bei 12 bit Graustufenauflösung zum Einsatz. Als Objektiv wurde ein Nikon

Normalobjektiv mit 60 mm Brennweite und einer Lichtstärke von 2,8 verwendet. Durch eine aus Sicherheitsgründen notwendige Kapselung des Messaufbaus war eine Filterung des Hintergrundlichtes nicht notwendig. Die Strömungsfelder wurden kongruent zur Phase aufgezeichnet, also immer dann, wenn der Rotor an derselben Position war. Die Einbringung der aus dem Lasersystem austretenden Laserstrahlen geschah mit Hilfe einer Strahlführung sowie einer passenden Lichtschnittoptik, welche es ermöglichte den Lichtschnitt und dessen Dicke auf die Messebene auszurichten. Sowohl die Lichtschnittoptik als auch die Kamera wurden aus schwingungstechnischen Gründen möglichst steif mit dem Pumpturbinen-Modell verbunden. Die Kameraposition wurde durch eine, in mehreren Achsen bewegliche, Traversier-Einrichtung normal zur planaren Fläche der Sichtfenster ausgerichtet. Als Laser-System wurde ein gepulster Nd:YAG-Laser der Firma New Wave Research mit bis zu 15 Hz Wiederholrate verwendet. Die maximale Pulsenergie betrug 120 mJ bei einer Wellenlänge von 532 nm.

Um den Bildmaßstab und optische Effekte besser beurteilen zu können, wurde für den relevanten Bereich der Leitschaufelverstellung eine Kalibration des Kamerasystems durchgeführt. Dazu wurden speziell angefertigte Kalibrationsraster an den zu untersuchenden Positionen im vollständig gefüllten Modell eingesetzt. Die Kameraoptik wurde darauf fokussiert und ein Kontrollbild erzeugt. Danach wurden die Raster wieder entfernt und an dessen Stelle der Lichtschnitt eingebracht. In radialer Blickrichtung kam es aufgrund der Überlappung der beiden Acrylglas-Leitschaufeln im Bereich der Austritts- bzw. Eintrittskante zu einem Verzerrungseffekt (Abb. 4). Da sich dieser Bereich je nach Winkelstellung der Leitschaufel änderte musste die Kalibration für alle Leitapparatstellungen durchgeführt werden.

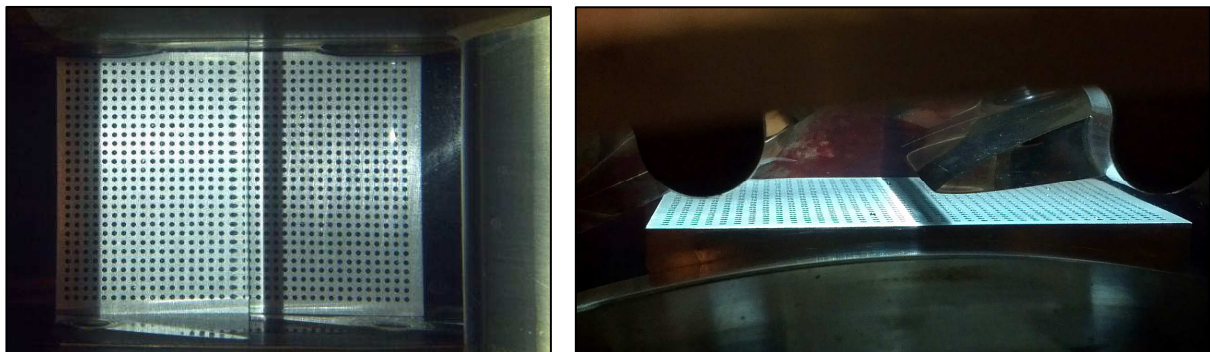


Abb. 4: Bilder aus der im vollständig gefüllten Modell durchgeführten Kalibration

Die Tracerinjektion in den Prüfstand basiert auf einer vor dem Modell installierten Injektionsvorrichtung. Sechs Messingröhrchen, die über den gesamten Strömungsquerschnitt mit Bohrungen versehen wurden, dienten dazu, die 5 bis 50 μm großen Tracer-Partikel in die Strömung einzubringen. Dazu wurde im Vorhinein ein Tracer-Wasser-Gemisch durch Zugabe einer Base und mit Hilfe von Ultraschall angereichert. Das Tracer-Wasser-Gemisch wurde während der Messung mit einer Injektionspumpe der Strömung beigemischt. Erste Vorversuche zeigten eine Anreicherung des Prüfstands, wodurch eine kontinuierliche Injektion nicht notwendig war. Um größere und damit für die PIV-Messung ungeeignete Partikel aus der Strömung zu entfernen wurde auf der Druckseite des Pumpturbinen-Modells ein drei-lagiges Filter mit einer Maschenweite von 0.5 mm installiert. Um dessen Einfluss auf die Messung zu beurteilen wurde der Zustand des Filters über die Veränderung der auftretenden Druckdifferenz überwacht. Sämtliche Modifikationen in der Geometrie wurden in einem separaten Versuch verifiziert und gezeigt, dass die hydraulische Charakteristik der Maschine nicht verändert wurde.

Die Konzentration der Partikel in der Strömung wurde mit Hilfe der Laserlichtschnittdicke und der Größe des Messvolumens abgeschätzt. Vorausgesetzt wurde eine homogene Verteilung

der Tracer im Wasser mit einer Anzahl von 5 bis 10 Tracer-Partikel pro Interrogation Area. Die Gesamtkonzentration im Wasser des Prüfstands betrug dabei ca. 45 ppm. Die bei einem Vorversuch ausgewählten Polyamid-Partikel mit 5-50 μm und mit nahezu gleicher Dichte wie Wasser stellten einen guten Kompromiss zwischen Folgevermögen (Stokes-Law), Reflektion des Lichtes und nicht gewünschten Auftriebseffekten dar. Die nahezu gleiche Dichte war von großer Bedeutung, da hohe Beschleunigungsanteile mit ca. 10-facher Erdbeschleunigung in radialer Richtung, welche auf der Umfangsgeschwindigkeit mit bis zu 16 m/s und zusätzlichen stark gekrümmten Strombahnen basieren, auftraten.

Versuchsdurchführung

Um einen gesamten Schaufelkanal des 9-schaufeligen Laufrades abzubilden wurden in jedem Betriebspunkt 21 Rotor-Stator-Positionen, je 2° phasenverschoben, untersucht. Für andere Kombinationen der Rotor-Stator-Position konnte eine Verzögerung der Aufnahmen zum Trigger-Signal eingestellt werden. Für eine Kreuzkorrelation des in der Phase verdrehten Laufrades wurden jeweils 190 Doppelbilder aufgezeichnet. Auf diese Weise wurden bis zu fünf Betriebspunkte bei drei unterschiedlichen Leitschaufelstellungen angefahren. Die Messkampagne umfasste insgesamt 2 Laufräder und jeweils 4 Messebenen, einer radialen und drei axialen. Hieraus ergaben sich 108 untersuchte Betriebspunkte. Da die Drehzahl des Laufrades mit den Betriebspunkten variierte und sich dadurch die Strömungsgeschwindigkeit veränderte, musste die Zeit zwischen den Laserblitzen angepasst werden, um gleichbleibende Verschiebungen zwischen den Bildern zu erhalten. Die folgenden Abbildungen zeigen Beispielaufnahmen aus der Testphase der PIV-Messungen. Daraus ersichtlich ist die in radialer Richtung aufgetretene Verzerrungen durch die starke Krümmung und Überdeckung der Leitschaufeln. In axialer Richtung konnte die Strömung nur in Ausschnitten sichtbar gemacht werden, da Abschattungen durch den aus konstruktiven Gründen begrenzten optischen Zugang und Schattenwürfe auftraten. Diese unerwünschten Bereiche mussten im Post-Processing maskiert werden. Die in den folgenden Abbildungen 5 und 6 dargestellten Linien sollen die Lage der untersuchten Messebenen andeuten.

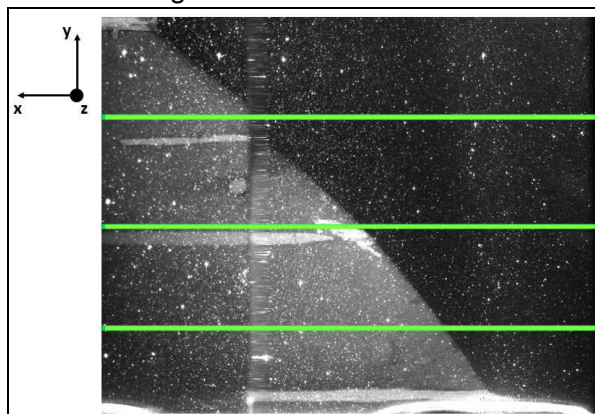


Abb. 5: Aufnahme der radialen Blickrichtung

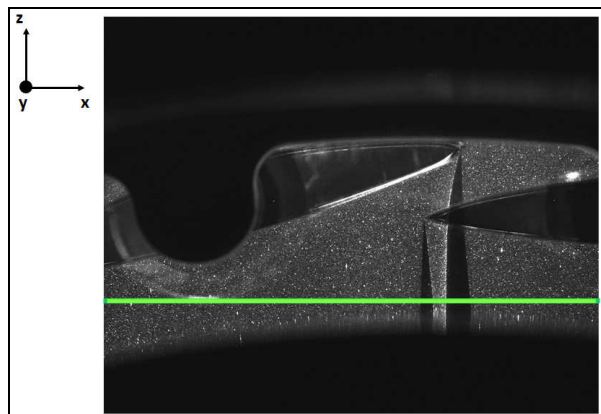


Abb. 6: Aufnahme der axialen Blickrichtung

Zur Steuerung des PIV-Systems und zur Erstellung der Vektorfelder wurde als erster Schritt das Software Packet Dantec Flow Manager V4.60 verwendet. Damit wurde die Maskierung gesetzt, die Fehlvektoren reduziert und letztendlich die Kreuzkorrelation durchgeführt. Dabei wurde zusätzlich zu der üblichen Optimierung durch Subpixel-Methoden mit einem Offset der Interrogation-Areas zueinander gearbeitet, um die in Umfangsrichtung gerichteten Geschwindigkeiten möglichst genau auflösen zu können. Für die Größe einer Interrogation-Area wurden 32x32 Pixel gewählt und mit 50 prozentiger Überlappung sowie einer 50 prozentigen Fensterung gearbeitet. Danach erfolgte der Export der Vektorfelder in ein mit MATLAB pro-

grammiertes Post-Processing-Tool, welches in der Versuchsauswertung noch näher beschrieben wird.

Versuchsauswertung

Die Versuchsauswertung erfolgte phasenorientiert, so ließen sich verschiedene Effekte, wie beispielsweise der Drehklang darstellen. Die Auswertung erfolgte hierbei in Anlehnung an das Kapitel der instationären Grenzschichttheorie des Buches Grenzschichttheorie von Gersten und Schlichting, 2005. Die Mittelung der gemessenen Vektorfelder wurde wie auch die Visualisierung mit Hilfe eines selbst geschriebenen Tools in MATLAB durchgeführt. Um die Ergebnisse miteinander vergleichen zu können wurde die gemessene, projizierte Absolutgeschwindigkeit mit der Umfangsgeschwindigkeit am Eintritt des Laufrades normiert. Die nachfolgenden Abbildungen zeigen exemplarische Versuchsergebnisse in Form von Konturplots, für eine konstante Rotor-Stator-Position. Es wird er Mittelwert aus 190 Vektorfeldern, die an einem Betriebspunkt aufgezeichnet wurden, visualisiert. Die Eintrittskante des Laufrades ist in Abbildung 7 links oben dargestellt und liegt in den gezeigten Ergebnissen mittig im jeweiligen Konturplot. Abbildung 7 zeigt die Auswertung der Ergebnisse für das lokale Optimum der Maschine. Wie erwartet ist darin eine weitgehend homogene Verteilung der Geschwindigkeitsvektoren über die Kanalhöhe zu sehen. Eine völlig andere Verteilung der Geschwindigkeiten ist in Abbildung 8 zu erkennen, welche einen Betriebspunkt nahe des Durchbrennens zeigt. Speziell auf der Saugseite der Laufschaufel ist eine starke Inhomogenität in der Geschwindigkeitsverteilung zu erkennen.

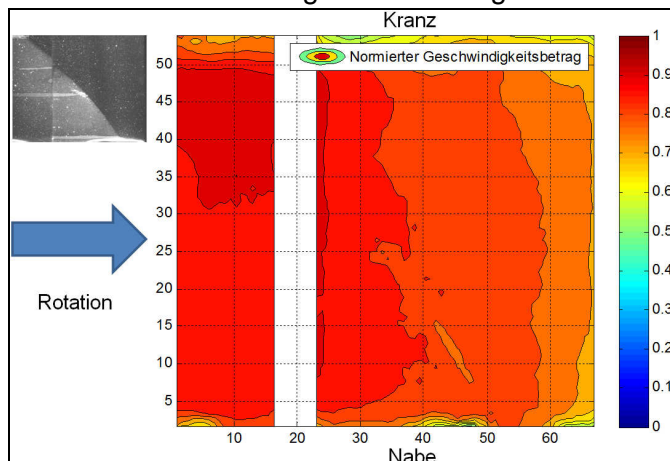


Abb. 7: Konturplot im lokalen Optimum

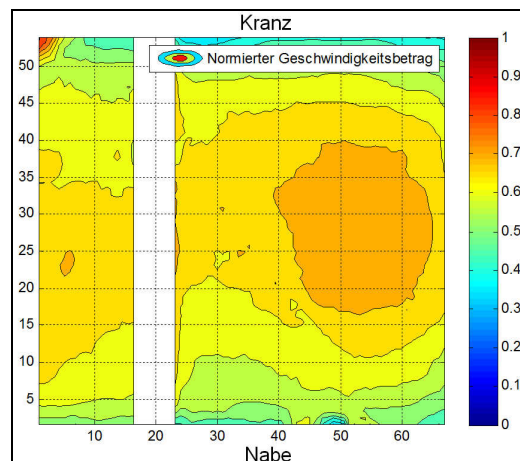


Abb. 8: Konturplot im Durchbrennen

Als Ergebnis der PIV-Messung werden 190 Einzelaufnahmen pro Laufrad-Leitradposition ausgegeben, welche zu einem gemittelten Vektorfeld zusammengefasst werden können. Von diesen Feldern kann dann wiederum für alle 20 Laufrad-Leitradposition eine Mittelung erfolgen, so dass die lokale Schwankung auf den einzelnen Laufrad-Leitradpositionen minimiert wird. Um die Periodizität zu verifizieren, wurden die erste und die letzte Laufrad-Leitrad-Position doppelt gemessen.

Um die Rezirkulationsgebiete, welche mit dem Laufrad umlaufend sind, besser analysieren zu können werden die Strömungsgeschwindigkeiten in ein mitrotiertes Koordinatensystem transformiert. Momentan werden die Aufnahmen mit Ergebnissen aus CFD-Simulationen, welche auf der Arbeit von T. Staubli, F. Senn und Manfred Sallaberger basieren, verglichen, um direkte Vergleiche zwischen den Vorhersagen der CFD-Ergebnisse und den PIV-Messungen zu erhalten.

Dankesworte

Diese wissenschaftliche Arbeit basiert auf einem von der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) unterstützten Projekt, welches mit dem Projektpartner Andritz Hydro AG durchgeführt wurde. Daher möchten sich die Autoren bei der FFG und der Andritz Hydro AG für die finanzielle Unterstützung bedanken. Für die Unterstützung bei der Inbetriebnahme sowie für die Bereitstellung des PIV-Systems wird dem Institut für thermische Turbomaschinen gedankt.

Zusätzlich gebührt der Republik Österreich und der Technischen Universität Graz für die Aufrechterhaltung des einzig verbliebenen, selbständigen Lehrstuhls für hydraulische Strömungsmaschinen im deutschsprachigen Raum der Dank der Autoren.

Literatur

Staubli, T., Senn, F., Sallaberger, M., 2008: "Instability of pump-turbines during start-up in the turbine mode", Proceedings of Hydro, Ljubljana

Dörfler, P., Sick, M., Coutu, A., 2013: "Flow-Induced Pulsation and Vibration in Hydroelectric", Springer Verlag

Dörfler, P., et al., 1998: "Stable operation achieved on a single stage reversible pump-turbine showing instability at no-load", 19. IAHR Symposium, Singapore

Raffel, M., Willert, C.E., Wereley, S.T., Kompenhans, J., 2007: "Particle Image Velocimetry: A Practical Guide", Springer Verlag

Brücker, C., Chaves, H., 2006: "Unterlagen zum Praktikum Messtechnik Particle Image Velocimetry", TU Bergakademie Freiberg

Schlichting, H., Gersten, K., 2005: "Grenzschicht-Theorie", Springer Verlag

International Standard: IEC 60193:1999, "Hydraulic turbines, storage pumps and pumpturbines – Model acceptance tests"