

STEREO-PIV MESSUNGEN ZUR BESTIMMUNG DES GESCHWINDIGKEITSFELDES IN EINEM HALBOFFENEN PUMPENLAUFRAD

MEASURING THE FLOWFIELD OF AN UNSHROUDED IMPELLER BY STEREO-PIV

Dipl.-Ing. Friedrich Fröhlig

Fachgebiet Strömungsmaschinen
Universität Karlsruhe (TH)
76128 Karlsruhe
email: froehlig@ism.uka.de

Dr.-Ing. Saban Caglar

Fachgebiet Strömungsmaschinen
Universität Karlsruhe (TH)
76128 Karlsruhe
email: caglar@ism.uka.de

Prof. Dr.-Ing. Martin Gabi

Fachgebiet Strömungsmaschinen
Universität Karlsruhe (TH)
76128 Karlsruhe
email: gabi@ism.uka.de

Stereo-PIV, Turbomaschinen, halboffenes Laufrad, Reynoldsspannungen,
Stereo-PIV. Turbomachinery, unshrouded impeller, Reynoldsstresses

Zusammenfassung

Halboffene Laufräder von Radialpumpen besitzen ein komplexes Strömungsfeld, das sich aus einer Superposition von Spalt- und Sekundärströmung zusammensetzt. Aus diesem resultieren viele offene Fragen (Axialschub, Mehrphasenströmung, Blasengröße) die mit CFD nur effizient beantwortet werden können, wenn Vergleichsmessungen zur Kalibrierung vorliegen. Um dieses Strömungsfeld besser zu verstehen und um Vergleichsdaten für CFD-Berechnungen zu gewinnen, wurden Stereo-PIV Messungen im Spalt und im Schaufelkanal eines halboffenen Laufrades einfacher Geometrie durchgeführt. Es wurden die relevanten Geschwindigkeiten sowie ihre Reynoldsspannungen untersucht. Insbesondere wurde auf die Genauigkeitsuntersuchung sowie die Reynoldsspannungen eingegangen.

Einleitung

Halboffene Laufräder sind wegen ihrer einfachen Fertigung, aber auch aufgrund ihrer Vorteile bei der Förderung feststoffbeladener Fluide weit verbreitet. Sie finden Verwendung in Abwasserpumpen, Kühlwasserpumpen (Automobilindustrie) und Heizungsumwälzpumpen. Trotz dieser Vorteile bedingt die halboffene Bauweise besonders in Bereichen des Betriebsvolumenstroms und der Überlast einen deutlich schlechteren Wirkungsgrad als bei geschlossenen Laufrädern.

Im Teillastbereich jedoch fällt dieser Verlust an Effizienz aufgrund des relativ komplexen Strömungsfeldes weniger stark aus (Abbildung 4). Dies ist auf eine Superposition der Sekundärströmung zwischen den Schaufeln und der Spaltströmung zurückzuführen. (Fröhlig et al. (2008) (ISROMAC))

Stereo-PIV ist eine zuverlässige und berührungsfreie Messmethode. Sie ermöglicht die simultane Erfassung ganzer Geschwindigkeitsvektorfelder, wohingegen Laser Doppler Anemometrie oder Hitzdrahtmessungen immer nur einen Punkt im Strömungsfeld erfassen. In Kombination mit dem Gesetz der großen Zahlen ermöglicht sie die Berechnung von Reynoldsspannungen.

Aufbau

Abbildung 1 zeigt den Aufbau der Messstrecke. Das Laufrad wird durch einen Elektromotor angetrieben. Eine Verstellvorrichtung ermöglicht die stufenlose Verstellung der Spaltweite s . Das Triggersignal wird von einer Drehmomentenmesswelle erzeugt, die Drehzahl und Drehmoment misst. Somit ist eine gleichbleibende Laufradposition garantiert. Kameras und Lichtschnittoptik sind auf derselben Traverse montiert, sodass bei einer Höhenverstellung keine erneute Kalibrierung erforderlich ist. Beide Kameras schauen von unten durch einen Plexiglaszylinder auf das Laufrad. Gemessen wurde in vier verschiedenen Ebenen (Abbildung 2). Die erste Ebene befindet sich in der Mitte zwischen dem Gehäuse (Plexiglaszylinder) und der offenen Laufradunterkante. Die weiteren drei Ebenen liegen bei 1 mm, 3 mm und 5 mm über der Laufradunterkante. Die Zuströmung in die Messstrecke erfolgt von unten durch ein langes, gerades Rohr, sodass ein gleichförmiges Geschwindigkeitsprofil am Ansaugstutzen gewährleistet ist. Die Ausströmung erfolgt durch sechs gleichförmig über den Umfang der Messstrecke angeordnete Schläuche gleicher Länge, um eine gleichmäßige Abströmung des Fluids zu garantieren.

Die beiden Kameras sind vom Typ PCO Sensicam QE mit einer Auflösung von 1376×1040 Pixeln. Als Lichtquelle diente ein Continuum Minilite PIV Laser. Die Seedingpartikel sind aus PMMA und haben eine Dichte von $\rho = 1,0016 \text{ kg/m}^3$ bei einem mittleren Durchmesser von $d = 37 \mu\text{m}$.

Abbildung 3 zeigt das hier verwendete Laufrad. Es besitzt fünf Schaufeln, die mit Hilfe eines Kreisbogens konstruiert sind. Der Schaufeleintrittswinkel beträgt $\beta_1 = 23^\circ$ bei einem Schaufelaustrittswinkel von $\beta_2 = 37^\circ$. Am Austritt haben die Schaufeln eine Breite von $b = 7 \text{ mm}$. Die Schaufelgeometrie wurde hier mit Absicht sehr einfach gewählt, um eine gute optische Zugänglichkeit zu gewährleisten.

Das Laufrad wird mit einer Drehzahl von $\omega = 2200 \text{ U/min}$ betrieben. Abbildung 4 zeigt die Kennlinie für den freiausblasenden Wirkungsgrad dieses Laufrades in Abhängigkeit vom Volumenstrom Q und der Spaltweite s . In dieser Arbeit wird zunächst nur die Spaltweite $s = 2 \text{ mm}$ behandelt. Für diese Spaltweite wird das Wirkungsgradmaximum bei einem Volumenstrom $Q = 8,4 \text{ m}^3/\text{h}$ erreicht. Dieser optimale Betriebspunkt soll im Folgenden mit „Optimalpunkt“ bezeichnet werden. Des Weiteren wurden noch je ein Betriebspunkt im Teillastbereich $Q = 6,72 \text{ m}^3/\text{h}$ sowie im Überlastbereich $Q = 10,5 \text{ m}^3/\text{h}$ vermessen.

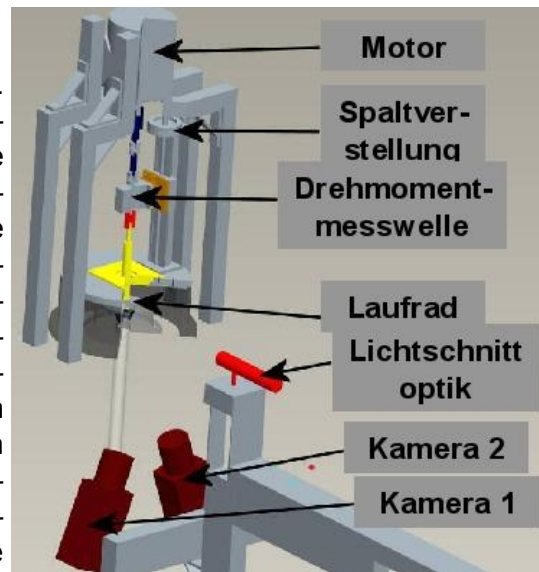


Abbildung 1: Aufbau der Messstrecke

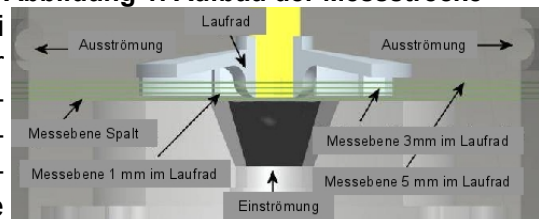


Abbildung 2: Lage der Messebenen

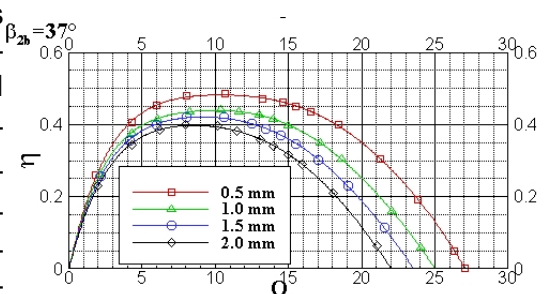
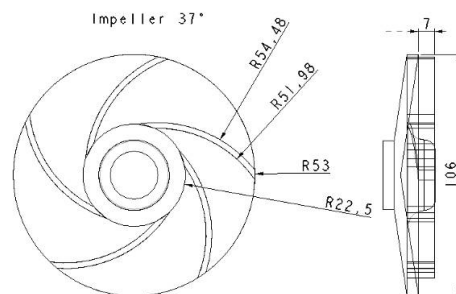


Abbildung 4: Wirkungsgradkurven bei verschiedenen Spaltweiten

Abbildung 3: Laufradgeometrie

Methode

Die in dieser Arbeit benutzte Stereo-PIV Konfiguration wird in Abbildung 5 gezeigt. Es wird die sogenannte „angular displacement“-Methode verwendet. Beide Kameras sind unter einem Winkel $\alpha = 20^\circ$ zur z-Achse geneigt. Dieser Winkel stellt einen Kompromiss zwischen der Genauigkeit in z-Richtung und der optischen Zugänglichkeit zum Laufrad dar. Im Falle zu großer Kamerawinkel würden die Schaufeln durch die Perspektive einen zu großen Bereich des Messgebietes im Laufrad verdecken. Die Bildebene ist um einen Winkel ϕ gegen die Linsenebene geneigt, sodass beide Ebenen einen gemeinsamen Schnittpunkt mit der Objektebene bilden, um die Scheimpflug-Bedingung zu erfüllen. Dies ist der Grund dafür, dass die beiden auf den Kameras abgebildeten Gebiete sich nicht optimal überdecken. Da die Scheimpflug-Bedingung auf jeden Fall erfüllt sein muss um eine gleichmäßige Bildschärfe zu garantieren, wurde der Abstand der beiden Kameras etwas verringert, sodass die optischen Achsen sich leicht vor der Objektebene schneiden, wie bei Westerweel und van Oord (1999) vorgeschlagen. Somit wird eine maximale Überdeckung beider Bilder erreicht.

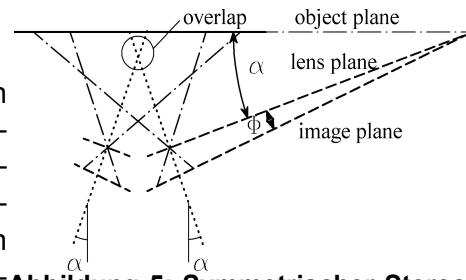


Abbildung 5: Symmetrischer Stereo-PIV Aufbau

Für diese Messungen wurden zwei Kameras vom Typ PCO Sensicam QE mit einer Auflösung von 1376 x 1040 Pixeln verwendet.

Es wurde die „double frame, double exposure“ Methode angewendet. Somit entstehen pro Aufnahme, je 2 Bilder von jeder Kamera. Zur Auswertung wurden die Bilder aufgrund der Perspektive entzerrt (Image Dewarping nach Willert 1997).

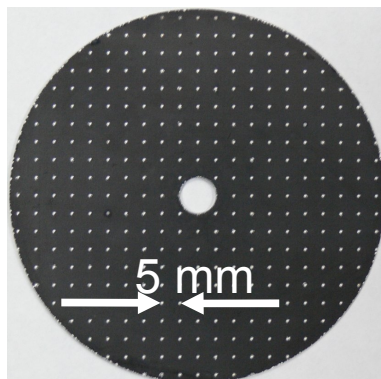


Abbildung 6: Kalibriertarget

Abbildung 6 zeigt das hier verwendete Kalibriertarget. Auf diesem ist mit Hilfe einer CNC Fräse ein äquidistantes Raster von Punkten mit dem Abstand 5 mm angebracht. Unter Verwendung dieser Punkte wurde nach dem sogenannten Tsai oder Pin-Hole-Kamera Modell ein Mapping (Abbildungsfunktion) für die perspektivisch verzerrten Bilder errechnet. Das perspektivische Tsai-Modell (1 Ebene) wurde verwendet, da es für $\alpha = 20^\circ$ bessere Werte lieferte als ein 3 oder 5 Ebenen gestütztes photogrammetrisches Mapping. Dies deckt sich auch mit Beobachtungen von Willert 2006. Mit Hilfe des oben beschriebenen Modells wurden die Bilder entzerrt. Anschließend erfolgte eine Kreuz-Korrelation mit einem Interogation Window von 64 x 64 Pixeln und einem Separation Window von 32 x 32 Pixeln. Diese wurde präzisiert durch eine adaptive Kreuz-Korrelation zunächst auf dem gleichen Gitter und anschließend mit einem Interogation Window von 32 x 32 Pixeln bei einem Separation Window von 16 x 16 Pixeln.

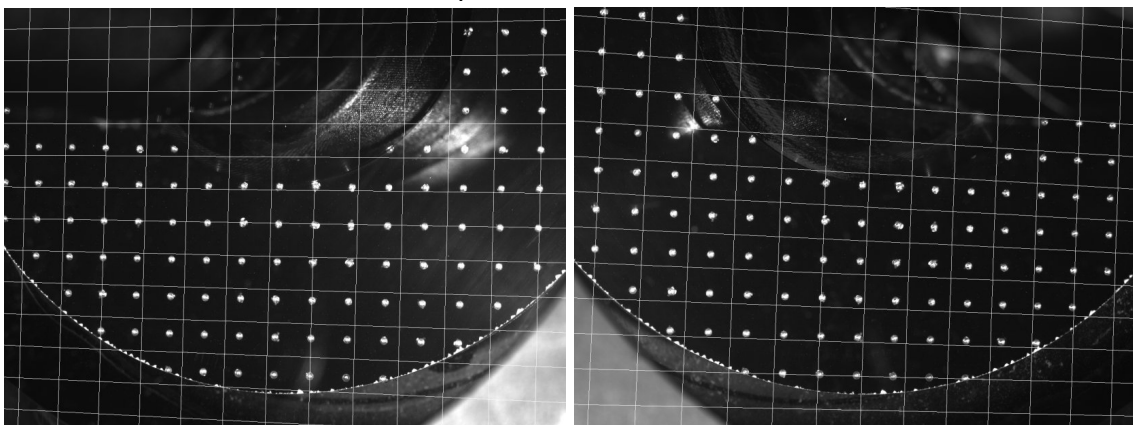


Abbildung 7: Kalibrierbilder mit Mapping Grid von Kamera 1 (links) und Kamera 2 (rechts)

Fehleranalyse/Genauigkeit

Da Referenzmessungen mit einem LDA zum Zeitpunkt dieser Arbeit nicht zur Verfügung stehen, muss eine Genauigkeitsanalyse der hier vorgenommenen Stereo-PIV Messungen über die Standardabweichung vom Erwartungswert erfolgen. Der Erwartungswert wird hier angenähert über eine Messung mit 3600 Aufnahmen also 7200 Doppelbildern. Wenn also ein quasistationärer Zustand existiert, muss mit zunehmender Anzahl an Aufnahmen der Mittelwert aus diesen Aufnahmen gegen den Erwartungswert konvergieren. Dies folgt aus dem Gesetz der großen Zahlen:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} P(|X_n - E(X)| < \epsilon) = 1$$

In Abbildung 8 sind die Standardabweichungen vom Erwartungswert über der Anzahl der Aufnahmen aufgetragen, links für die Absolutgeschwindigkeitskomponenten und rechts für die Reynoldsspannungen. Man sieht ein eindeutig konvergentes Verhalten. Bei der Auswertung von etwa 3200 Aufnahmen liegt die Standardabweichung der Absolutgeschwindigkeitsanteile vom Erwartungswert bei etwa einem Prozent und für die Reynoldsspannungen bei etwa zwei Prozent. Dies erscheint auch vor dem Hintergrund der Speicherkapazität, eine Messung mit 3600 Aufnahmen benötigt etwa 50 GB ausreichend genau.

Auch anhand der Histogramme der Geschwindigkeitsschwankungen (Abbildung 9) sieht man, dass eine ausreichende Anzahl an Aufnahmen ausgewertet wurde, da diese sich nahe an einer Gaußverteilung befinden.

Abbildung 10 zeigt die Lage des Lichtschnittes im Raum, berechnet über das Tsai-Model. Er weist eine leichte Schiefelage auf (ca. 0,36 mm in z auf 40 mm in y). Dies kann der Grund für leichte Asymmetrien in den Messergebnissen sein.

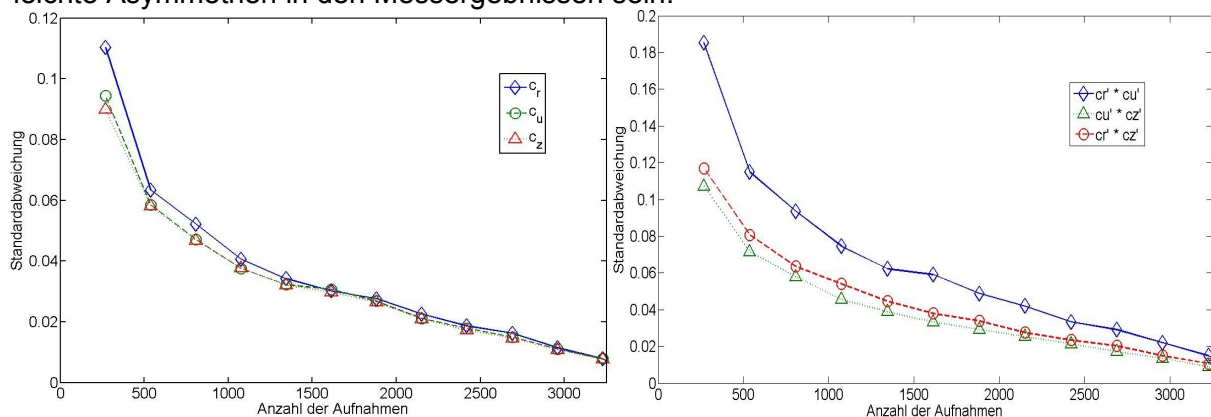


Abbildung 8: Standardabweichung vom Erwartungswert in Abhängigkeit der getätigten Aufnahmen, Absolutgeschwindigkeitskomponenten (links), Reynoldsspannungen (rechts)

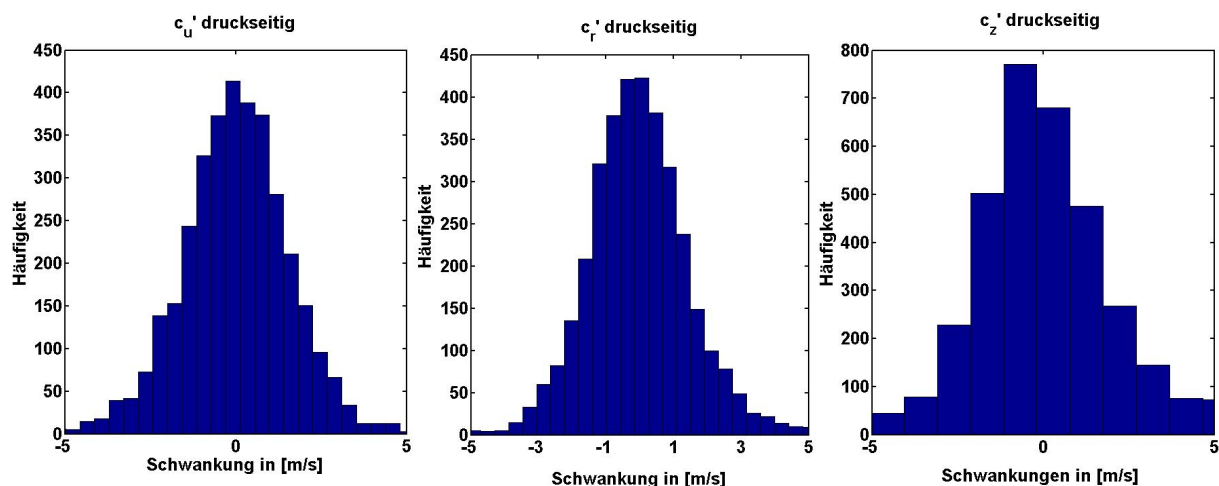


Abbildung 9: Histogramme der turbulenten Schwankungen eines druckseitigen Punktes

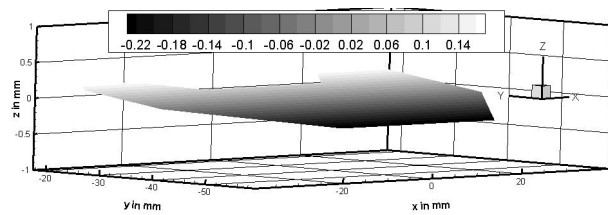


Abbildung 10: Lage des Lichtschnittes im Raum

zum selben Zeitpunkt korreliert. Das Ergebnis dieser Korrelation zeigt Abbildung 11. Die Vektoren sind zur besseren Visualisierung hier um Faktor 10 vergrößert. Der durchschnittliche Fehler durch diesen Effekt konnte auf 0,1 mm bis 0,2 mm beziffert werden. Fehler durch unterschiedlich lange, optische Wege in den verschiedenen Medien sowie die Unterschiede in den Brechungsindizes von Wasser, Plexiglas und Luft konnten hier nicht berücksichtigt werden.

Durch Fehler in der Überlappung des gleichen Bildes von Kamera 1 und Kamera 2 können Fehler in der Z-Komponente der Geschwindigkeit entstehen. Dieser Fehler wurde durch eine sogenannte Disparity Map bestimmt und teilweise korrigiert. Zur Berechnung dieser, werden Bilder beider Kameras

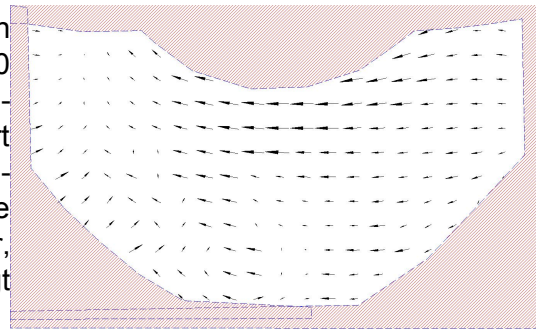


Abbildung 11: Disparity Map

Ergebnisse

Die Abbildungen 12 bis 15 zeigen die Absolutgeschwindigkeit sowie ihre Komponenten im Spalt. Die Konturen sind weitestgehend rotationssymmetrisch. Lediglich die Radialkomponente zeigt leichte Asymmetrien. Dies ist vermutlich auf die leichte Schräglage des Lichtschnittes zurückzuführen. Zur Erklärung des eigentlichen Geschwindigkeitsfeldes im Laufrad sei auf Fröhlig et al. (2008) (ISROMAC) verwiesen. Abbildungen 16 bis 21 zeigen den Turbu-

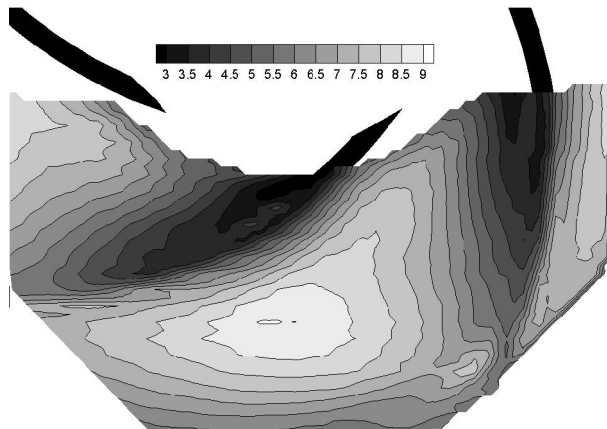


Abbildung 12: cabs im Optimalpunkt in m/s

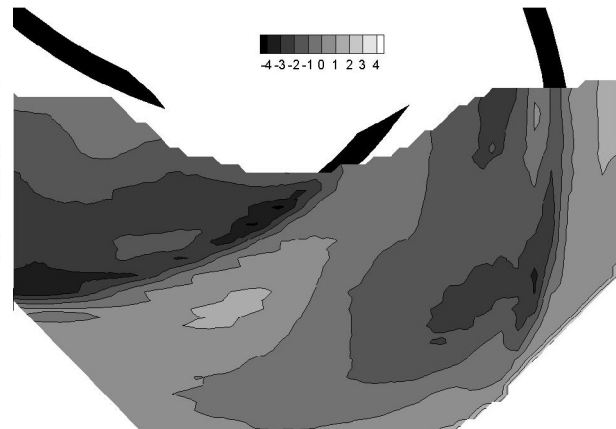


Abbildung 14: cr Optimalpunkt in m/s

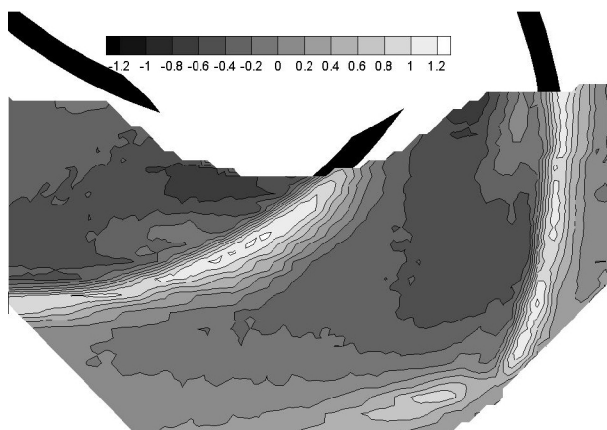


Abbildung 13: cz im Optimalpunkt in m/s

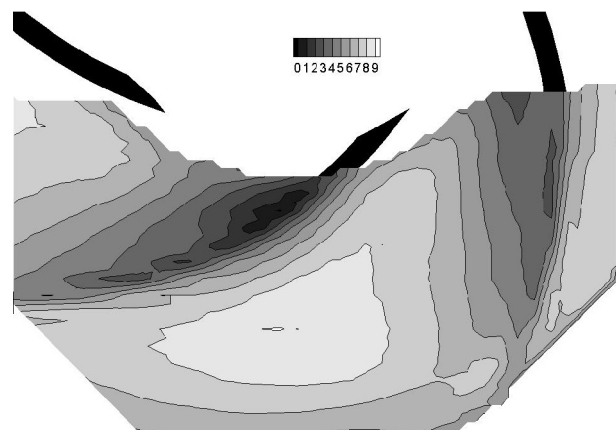


Abbildung 15: cu Optimalpunkt in m/s

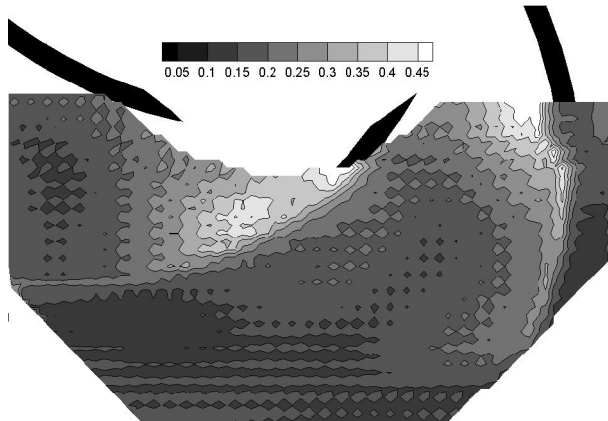


Abbildung 16: T_u , Teillast, im Spalt

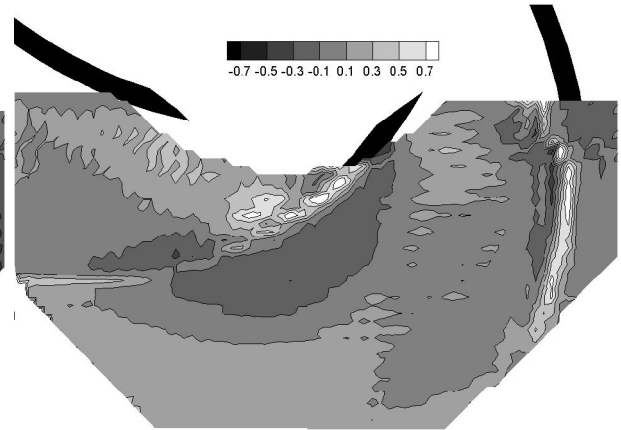


Abbildung 17: $\tau_{u,r}$, Teillast, im Spalt

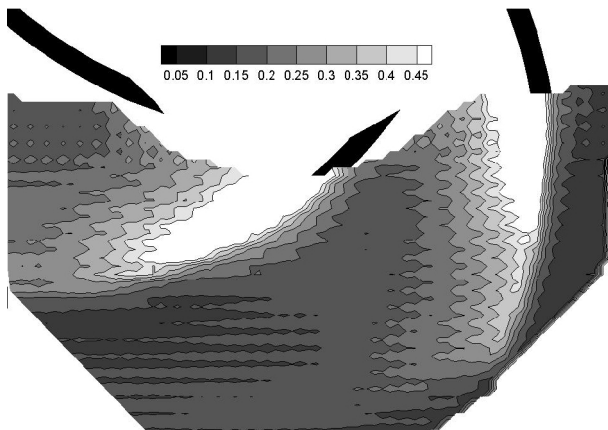


Abbildung 18: T_u , Optimalpunkt, im Spalt

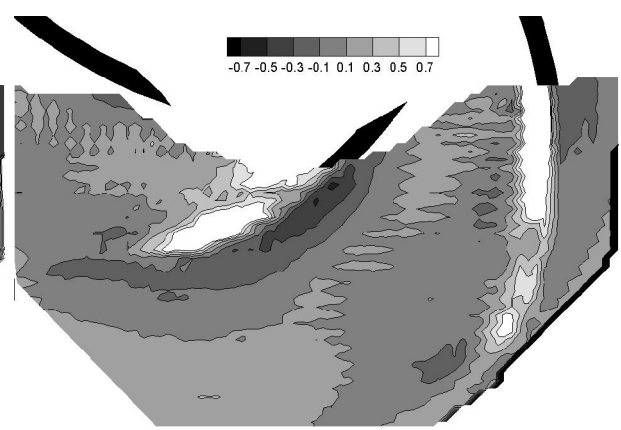


Abbildung 19: $\tau_{u,r}$, Optimalpunkt, im Spalt

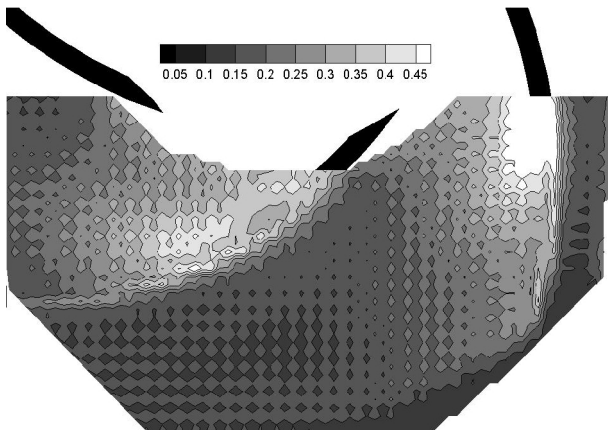


Abbildung 20: T_u , Überlast, im Spalt

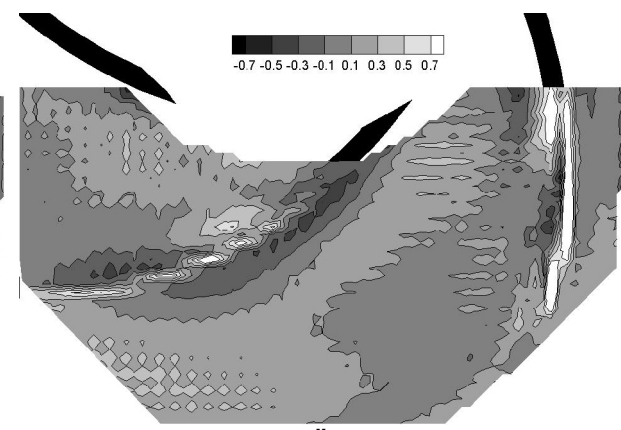


Abbildung 21: $\tau_{u,r}$, Überlast, im Spalt

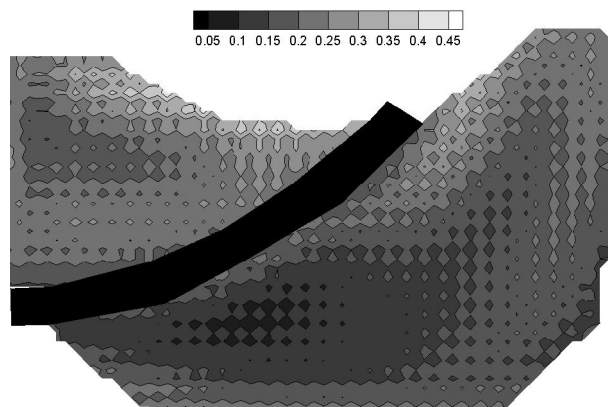


Abbildung 23: T_u , Teillast, 3mm im Lauftrad

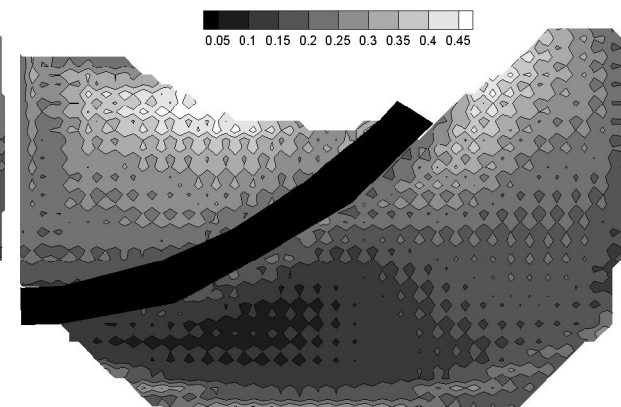


Abbildung 22: T_u , Teillast, 5mm im Lauftrad

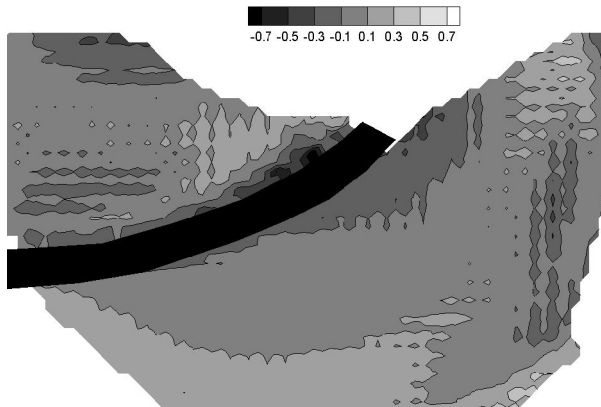


Abbildung 24: $\tau_{u,r}$, Teillast, 1mm im Laufrad

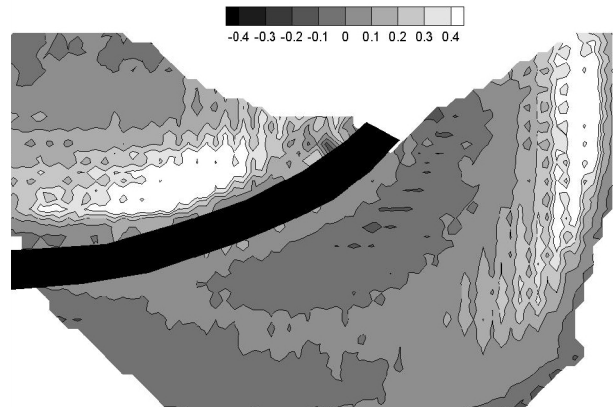


Abbildung 25: $\tau_{r,z}$, Teillast, 1mm im Laufrad

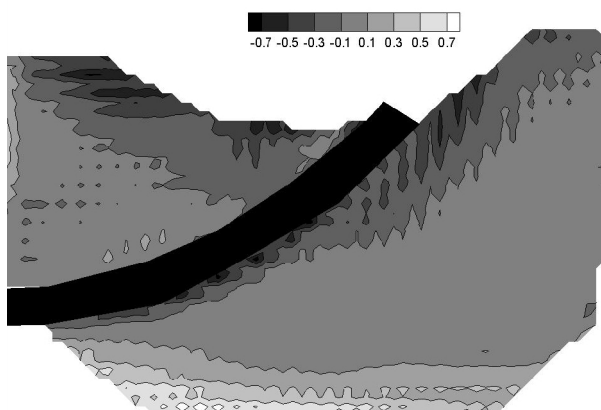


Abbildung 26: $\tau_{u,r}$, Teillast, 3mm im Laufrad

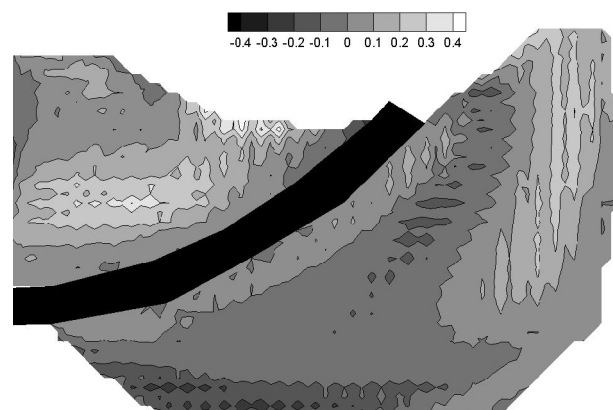


Abbildung 27: $\tau_{r,z}$, Teillast, 3mm im Laufrad

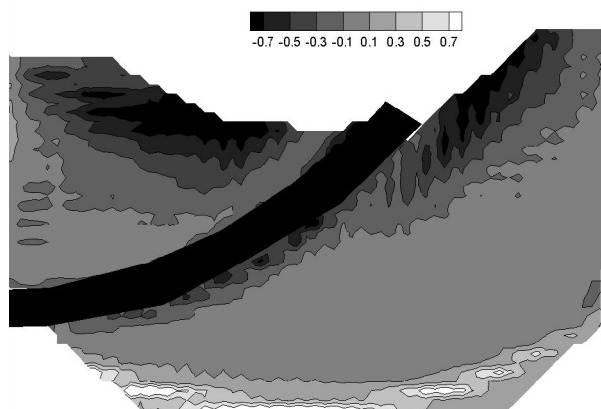


Abbildung 28: $\tau_{u,r}$, Teillast, 5mm im Laufrad

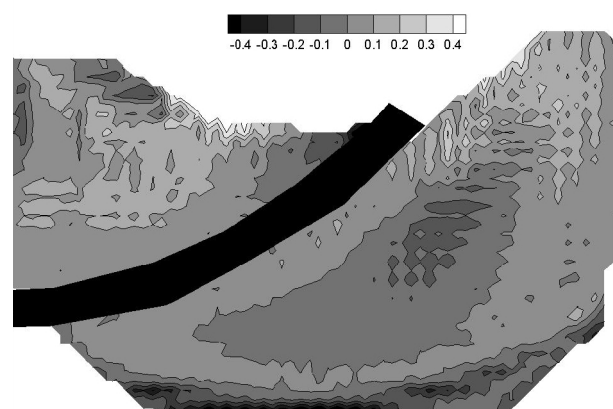


Abbildung 29: $\tau_{r,z}$, Teillast, 5mm im Laufrad

lenzgrad sowie die Reynoldsspannung $\tau_{u,r}$ im Spalt. Das Gebiet stärkster Turbulenz befindet sich im Spalt und auf der Saugseite der Schaufel. Darüber hinaus ist die Turbulenz im Optimalpunkt weit stärker als im Teillast- oder Überlastbereich. Die Reynoldsspannung $\tau_{u,r}$ zeigt besonders auf der Druckseite starke Unterschiede zwischen den verschiedenen Lastzuständen. Generell finden sich negative Reynoldsspannungen eher druckseitig und positive vorwiegend saugseitig. Auch hier findet sich die stärkste Ausprägung im Bereich des optimalen Wirkungsgrades (Optimalpunkt). Dies gilt auch für die Reynoldsspannung $\tau_{r,z}$. Abbildungen 16, 23 und 22 zeigen, dass der Turbulenzgrad vom Spalt zur Laufradmitte abnimmt und in Richtung Tragscheibe wieder leicht anwächst.

In den Abbildungen 24 bis 28 sind die Reynoldsspannungen $\tau_{u,r}$ und $\tau_{r,z}$ über die Laufradtiefe abgebildet. Starke, negative $\tau_{u,r}$ finden sich am Schaufelkanaleintritt sowie an der Schaufel und nehmen Richtung Tragscheibe zu. $\tau_{r,z}$ hingegen ist auf der Saugseite in Spaltnähe am Stärksten.

Schlussbemerkung

Stereo-PIV Messungen wurden erfolgreich an einem halboffenen, freiausblasenden Radialpumpenlaufrad durchgeführt. Es ist ein aussagekräftiges Instrument, um diese komplexe Strömung zu beschreiben. Aus den Ergebnissen wurden die Reynoldsspannungen und der Turbulenzgrad berechnet. Der höchste Turbulenzgrad und die stärksten Reynoldsspannungen finden sich im Spalt bei optimalem Betriebsvolumenstrom. Vom Spalt zur Laufradmitte nimmt der Turbulenzgrad ab und wächst dann zur Tragscheibe hin wieder leicht an. Insgesamt wurde ein stark anisotropes Turbulenzverhalten beobachtet.

Nomenklatur

Griechische Symbole	R	Radius
α Kamerawinkel in der xz-Ebene	s	Spaltweite
β Schaufelwinkel	Tu	Turbulenzgrad $\sqrt{\frac{u^2 + v^2 + w^2}{3c_{loc}^2}}$
η Wirkungsgrad	u	Umfangsgeschwindigkeit oder x-Komponente der Absolutgeschwindigkeit
ϕ Scheimpflugwinkel	v	y-Komponente der Absolutgeschwindigkeit
ρ Dichte in kg/m ³	w	z-Komponente der Absolutgeschwindigkeit
τ Reynoldsspannung normiert mit $\omega^2 R^2$	Indices	
ω Drehzahl	u	Umfangskomponente
Symbole	r	Radialkomponente
c Absolutgeschwindigkeit	z	Axialkomponente
Q Volumenstrom	loc	lokal

Literatur

- Choi, Y. D., et al., 2004, Experiments in Fluids, Vol.37, p. 617-630
- Domm, U., Hergt, P., 1963, Die Energieverteilung in drei Radialrädern verschiedener Breite, KSB Technische Berichte 6
- Fröhlig, F., Caglar, S., Gabi, M., "Measurements in an unshrouded Pump Using Stereo-Particle-Image Velocimetry", Proc. of the 12th International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery, (ISROMAC12-2008-20030)
- Gülich, J.F., 1999, Kreiselpumpen, Springer Berlin
- Jähne, B., 1997, Digitale Bildbearbeitung, 4th Edition, Springer Berlin, pp.263
- Klein, F., 1968, Elementarmathematik vom höheren Standpunkt aus, zweiter Band: Geometrie, Springer Berlin p.92
- Lauer, J., et al., 1997, Tip clearance sensivity of centrifugal pumps with semi-open impellers, ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting FEDSM'97
- Raffel, M., Willert, C., Kompenhans, J., Particle image velocimetry, 3rd printing, Springer 1998
- Westerweel, J., van Oord, J. 1999, Stereoscopic PIV measurements in a turbulent boundary layer. In: Stainslaus M., Kompenhans, J., Westerweel, J., Particle Image Velocimetry: progress toward industrial application. Kluwer, Dordrecht
- Willert, C. 1997, Stereoscopic digital Particle Image Velocimetry for application in wind tunnel flows, Meas. Sci. Technol. 8 (1997) p. 1465-1479
- Willert, C. 2006, Assessment of camera models for use in planar velocimetry calibration, Experiments in Fluids (2006) 41, 135-143