

15. Fachtagung "Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik"
4. – 6. September 2007, Rostock

**UNTERSUCHUNG DES PERIODISCH-INSTATIONÄREN GESCHWINDIGKEITSFELDES
IM LAUFRAD UND IM BESCHAUFELTEN DIFFUSOR EINER RADIALEN
KREISELPUMPENSTUFE KLEINER SPEZIFISCHER DREHZAHL MIT DER PIV-
METHODE**

F.-K. Benra, H. J. Dohmen, J. Feng

Universität Duisburg-Essen,

Fakultät für Ingenieurwissenschaften

Institut für Energie- und Umweltverfahrenstechnik

Strömungsmaschinen

Lotharstr. 1, 47057 Duisburg

Friedrich.benra@uni-due.de

Kurzfassung

Zur Erweiterung des Verständnisses von Laufrad/Leitrad Wechselwirkungen wurden in einer Radialpumpe kleiner spezifischer Drehzahl im Auslegungspunkt PIV-Messungen für mehrere verschiedene Laufradstellungen relativ zur Diffusorbeschaufelung bei halber Schaufelhöhe durchgeführt. Der Messbereich umfasste einen kompletten Laufradkanal und einen kompletten Leitradkanal. Die Analyse der gemessenen Strömungsfelder zeigt eine „Jet-wake“-Struktur in der Nähe des Laufradaustrittsdurchmessers. Die Anwesenheit der Diffusorbeschaufelung beeinflusst die Strömung im Laufrad hauptsächlich im hinteren Teil des Schaufelkanals in der Nähe des Laufradaustrittsdurchmessers. Die Strömung in der Diffusorbeschaufelung hängt stark von der Winkelposition der Laufradbeschaufelung ab. Je nach Laufradstellung erhält die Leitradbeschaufelung unterschiedliche Zuströmbedingungen, die zu geänderten Strömungsverhältnissen im Leitrad führen.

Einleitung

Die Strömung in radialen Pumpen mit beschaufeltem Diffusor ist geprägt durch periodisch instationäre Wechselwirkungen, die durch die Relativbewegung zwischen dem rotierenden Laufrad und dem feststehenden Leitrad hervorgerufen werden. Diese Wechselwirkungen haben erheblichen Einfluss auf das Strömungsfeld und können somit das Betriebsverhalten der Pumpe negativ beeinflussen und im Extremfall zu instationären Strömungsphänomenen wie z. B. rotierenden Ablösungen führen.

Numerische Untersuchungen des zeitabhängigen Strömungsfeldes wurden z. B. von Bert et al. [1], Ardizzon und Pavesi [2, 3], He und Sato [4] und Benra und Dohmen [5] durchgeführt. Experimentelle Untersuchungen der zeitabhängigen Strömung können vorteilhaft mit optischen Methoden durchgeführt werden, da sie keinerlei Störung der Strömung verursachen. Die PIV-Methode wurde z. B. von Akin und Rockwell [6] benutzt, um die Wechselwirkung der Nachlaufdelle eines Modellaufrades mit einer stationären Diffusorschaufel zu untersuchen. Sinha et al. [7] benutzten ebenfalls die PIV-Methode, um die Struktur der instationären Strömung sowie die Turbulenz in einer Radialpumpe mit beschaufeltem Diffusor zu beschreiben. Wuibaut et al [8 - 10] wendeten die PIV-Methode an, um das Strömungsfeld im Laufrad eines Prüfstandes zu messen, der mit Luft betrieben wurde. Alle ausgeführten Untersuchungen tragen zum Verständnis der komplexen instationären Strömung infolge von Laufrad/Leitrad Wechselwirkungen in Radialpumpen mit beschaufeltem Diffusor bei. Es kann jedoch festgestellt werden, dass das vorhandene Wissen nicht ausreicht, um die Auswirkungen der Wechselwirkungen auf den Pumpenbetrieb sicher einzuschätzen. Gerade bei Pumpen mit kleiner spezifischer Drehzahl, die bei kleinen Volumenströmen hohe Drücke erzeugen, können die instationären Wechselwirkungen erhebliche Auswirkungen auf das Betriebsverhalten haben. Aus diesem Grunde wird in diesem Beitrag die periodisch instationäre Strömung in einer derartigen Pumpe im Laufrad und im Leitrad mit der PIV-Methode eingehend untersucht. Die

32.2

Messungen fanden bei mehreren relativen Positionen zwischen Laufrad und Leitrad bei halber Schaufelhöhe im Auslegungspunkt der Pumpe statt und umfassten jeweils einen Laufradkanal und einen Leitradkanal.

Prüfstand

a) Pumpengeometrie

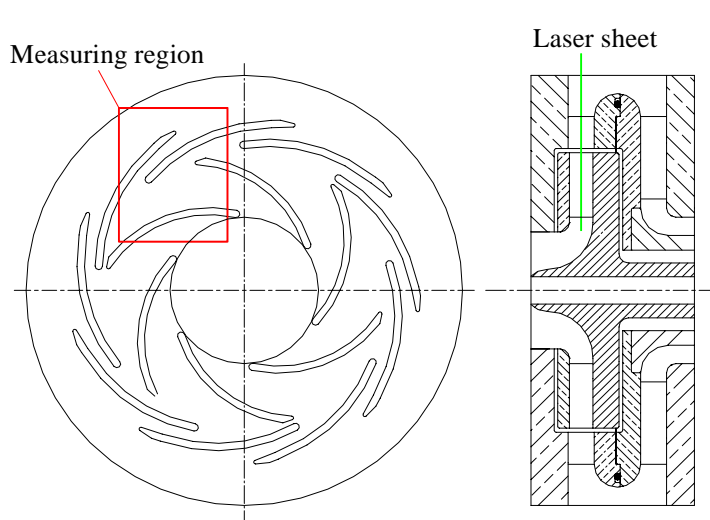
Die untersuchte Pumpe ist eine komplette Pumpenstufe, bestehend aus einem Laufrad, einem beschaukelten Diffusor, einer 180°-Umlenkung und einem beschaukelten Rückführkanal. Das Laufrad hat 6 stark rückwärts gekrümmte Schaufeln und ist mit einer Deckscheibe ausgestattet. Der Diffusor sowie der Rückführkanal sind mit je 9 Schaufeln ausgerüstet. Alle Schaufeln sind zylindrisch (2-dimensional) und mit konstanter Dicke und konstanter Höhe ausgeführt, um die PIV-Messungen zu erleichtern. Die komplette Pumpe ist aus Plexiglas gefertigt und wird von einem drehzahlregelbaren Elektromotor angetrieben. Die Pumpe entnimmt Wasser aus einem Tank, der ein Volumen von 3 m³ hat und fördert es dorthin über eine Druckleitung zurück. In der Druckleitung der Pumpe ist ein Drosselventil angeordnet über das der gewünschte Volumenstrom eingestellt werden kann. Über ein induktives Durchflussmessgerät wird die Fördermenge der Pumpe bestimmt. Die wichtigsten geometrischen Abmessungen der Pumpenstufe können der Tabelle 1 entnommen werden.

Laufradschaufelzahl	Z_L	6
Eintrittsdurchmesser des Laufrades	D_1	80 mm
Austrittsdurchmesser des Laufrades	D_2	150.5 mm
Laufradhöhe	b_L	12.7 mm
Anzahl der Diffusorschaufeln	Z_D	9
Eintrittsdurchmesser des Diffusors	D_3	155 mm
Austrittsdurchmesser des Diffusors	D_4	190 mm
Höhe des Diffusors	b_D	14 mm
Anzahl der Rückführschaufeln	Z_R	9
Eintrittsdurchmesser des Rückführkanals	D_5	190 mm
Austrittsdurchmesser des Rückführkanals	D_6	100 mm
Höhe des Rückführkanals	b_R	14 mm
Auslegungsvolumenstrom	Q_{Aus}	0.0045 m ³ /s
Auslegungsdrehzahl	N_{Aus}	1450 min ⁻¹
Auslegungsförderhöhe	H_{Aus}	7 m

Tabelle 1: Pumpendaten

b) PIV-System

In Bild 1 sind ein achsparalleler Schnitt und ein achsnormaler Schnitt durch die Pumpe dargestellt. In den Achsnormalschnitt ist der Messbereich, der mit der PIV-Kamera erfasst wird, eingetragen während in dem achsparallelen Schnitt die Position des Lichtschnittes dargestellt ist. Als Lichtquelle wurde ein Dual Nd-Yag-Laser mit einer Wellenlänge von 532 nm benutzt. Die Wiederholfrequenz des Lasers betrug 15 Hz und die maximale Lichtenergie pro Puls betrug 120 mJ. Der aus dem Laserkopf austretende Lichtstrahl wurde durch einen flexiblen Lichtarm und über eine Lichtschnittoptik mit einstellbarer Lichtschnittdicke in das Messobjekt eingeleitet. Der Lichtschnitt hatte eine Dicke von ca. 1 mm und einen Divergenzwinkel von etwa 15°. Dem gepumpten Wasser wurden Polyamidpartikel mit einem mittleren Durchmesser von ca. 20 µm beigemischt. Die Dichte der Partikel lag mit $\rho_P=1,016$ g/cm³ nahe bei der Fluidichte, was ein gutes Folgevermögen der Partikel erwarten ließ.



Um Messungen mit unterschiedlichen Laufradstellungen in Relation zur Leitradbeschaufelung durchführen zu können, wurde ein induktiver Sensor an der Pumpenwelle befestigt. Durch die bekannte Zuordnung der Sensorposition zur Laufradstellung konnte mit dem erfassten Impuls die Position des Laufrades relativ zur Leitradbeschaufelung erfasst werden. Alle weiteren Laufradstellungen wurden softwaremäßig durch eine entsprechende Zeitdifferenz relativ zu dieser Ursprungsposition eingestellt.

Bild 1: Schematische Darstellung des Messbereichs

Die Bilder des Strömungsfeldes wurden mit einer CCD-Kamera mit einer Auflösung von 1024x1080 Pixeln und einer 8 bit Graustufenauflösung aufgenommen. Die Kamera war senkrecht zum Lichtschnitt auf einem 2D-Traversiersystem aufgebaut. Bei jeder Laufradposition wurden 200 Doppelbilder aufgenommen. Die Zeit zwischen den Laserpulsen war zu $30\mu\text{s}$ gesetzt, was einem Drehwinkel des Laufrades von $0,26^\circ$ bei der Auslegungsdrehzahl entsprach. Vor den Messungen wurde ein Kalibrierziel in die mit Wasser gefüllte Pumpe eingebracht, um den Abbildungsmaßstab zu ermitteln. Die Auswertung der Messungen wurde mittels einer adaptiven Korrelation und einem Interrogationsbereich von 32×32 Pixeln bei einer Überlappung von 50% in jeder Richtung durchgeführt. Damit ergaben sich 63×79 Strömungsvektoren für ein Bild der Größe $58 \times 72,5 \text{ mm}^2$. Anschließend wurde eine gleitende Mittelwertbildung mit einer Mittelungsfläche von 3×3 Vektoren angewendet, um das Vektorfeld anhand der Nachbarvektoren zu validieren. Zuletzt wurden für alle bei der gleichen Laufradposition aufgenommenen Bilder Statistikfunktionen angewendet, um das phasengemittelte Geschwindigkeitsfeld und die Standardabweichung der Geschwindigkeitskomponenten zu ermitteln.

Diskussion der Ergebnisse

Die Strömung der Pumpe wurde bei 17 verschiedenen Laufradpositionen im Auslegungspunkt der Pumpe bei halber Schaufelhöhe gemessen. Die für zwei orthogonale Richtungen bestimmten Geschwindigkeitskomponenten u und v können in je zwei Anteile zerlegt werden: in eine phasengemittelte Komponente, die abhängig von der Laufradstellung und vom Messort ist und in eine Schwankungskomponente, die die Turbulenzeffekte repräsentiert (s. Gl. (1) und (2)). Die Bestimmung der phasengemittelten Geschwindigkeitskomponenten lässt sich mit den Gleichungen (3) und (4) durchführen.

$$u(x, y, \theta, t) = \bar{u}(x, y, \theta) + u'(x, y, \theta, t) \quad (1)$$

$$v(x, y, \theta, t) = \bar{v}(x, y, \theta) + v'(x, y, \theta, t) \quad (2)$$

$$\bar{u}(x, y, \theta) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} u(x, y, \theta, t_0 + i\Delta t) \quad (3)$$

$$\bar{v}(x, y, \theta) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} v(x, y, \theta, t_0 + i\Delta t) \quad (4)$$

32.4

N ist dabei die Anzahl der Vektorfelder für dieselbe Laufradposition, Θ beschreibt die Laufradstellung und Δt ist die Zeitspanne für eine Laufradumdrehung.

In Bild 2 ist das Feld der gemessenen phasengemittelten Absolutgeschwindigkeiten in der Ausgangsstellung des Laufrades ($\varphi = 0^\circ$) in der von der Kamera erfassten Fläche dargestellt. Das Laufrad dreht sich im Uhrzeigersinn. Andere Laufradstellungen sind in Relation zu dieser Ausgangsstellung bezeichnet. Zur übersichtlichen Darstellung ist die Dichte des Vektorfeldes um den Faktor 4 reduziert, was bedeutet, dass nur jeder zweite Vektor in beiden Koordinatenrichtungen gezeigt ist.

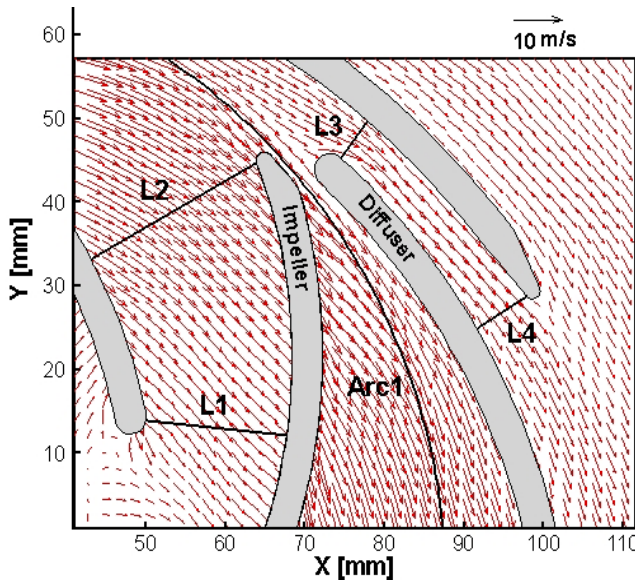


Bild 2: Phasengemitteltes Vektorfeld der Absolutgeschwindigkeit für $\varphi = 0^\circ$

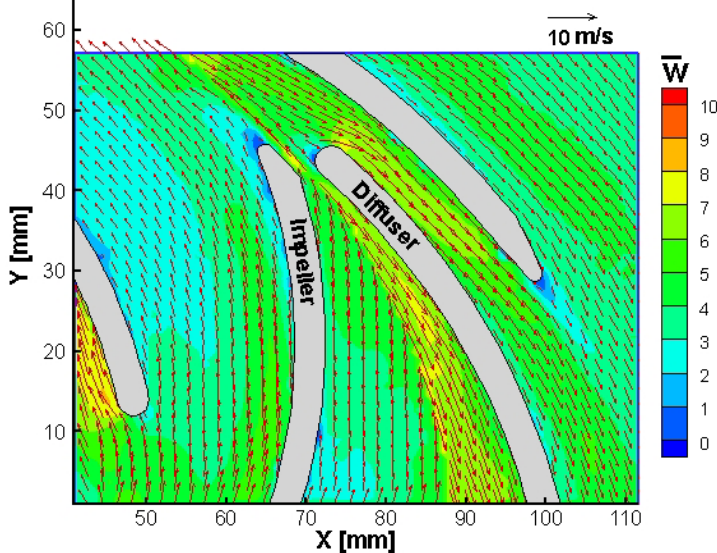


Bild 3: Phasengemitteltes Vektorfeld der Relativgeschwindigkeit für $\varphi = 0^\circ$

Da die Kamera im Absolutsystem positioniert ist, können nur die Absolutgeschwindigkeiten direkt gemessen werden. Die Darstellung der Relativgeschwindigkeiten im Laufrad gelingt durch die Anwendung der bekannten und mit Gleichung (5) beschriebenen Vektoraddition.

$$\vec{C} = \vec{U} + \vec{W} \quad (5)$$

Das zu Bild 2 korrespondierende phasengemittelte Vektorfeld der Relativgeschwindigkeiten ist in Bild 3 dargestellt. Am Eintritt in das Laufrad liegt ein positiver Anstellwinkel vor. Dadurch ergibt sich in der Nähe der Eintrittskante an der Saugseite der Schaufel ein Bereich mit relativ hohen Strömungsgeschwindigkeiten.

Entlang der Saugseite wird die Strömung bis zur Schaufelhinterkante verzögert. An der Druckseite der Laufradschaufel ist ein ausgedehnter Bereich mit kleinen Strömungsgeschwindigkeiten erkennbar, jedoch löst die Strömung an der Schaufeloberfläche nicht ab. Es kann ebenfalls beobachtet werden, dass die Relativgeschwindigkeiten im vorderen Bereich der Saugseite der Laufradschaufel größer sind als an der Druckseite. Durch den Anstieg der Corioliskräfte mit größer werdendem Laufradradius kehrt sich dieses Verhalten zum Laufradaustritt hin um. Die

Corioliskräfte (Gl. (6)) treiben das Fluid von der Saugseite zur Druckseite der Schaufel.

$$\vec{F}_C = 2m(\vec{W} \times \vec{\omega}) \quad (6)$$

In der Nähe des Laufradaustrittes sind an der Saugseite der Schaufel ein Bereich geringer Strömungsgeschwindigkeiten und in der Nähe der Druckseite ein Bereich hoher Geschwindigkeiten erkennbar. Diese Strömungsform ist bereits früher von anderen Autoren (z. B. [8, 9]) beschrieben worden. Die Strömung im beschauften Diffusor zeigt an der Schaufelvorderkante einen leicht in Richtung Saugseite verschobenen Staupunkt. Für diese Laufradposition relativ zur Diffusorbeschaufelung liegt damit ein Überlastbetrieb vor. Am Austritt der Leitrad-schaukel ist ein Bereich geringer Geschwindigkeit direkt hinter der Schaufelaustrittskante erkennbar.

Um den Einfluss der Laufradposition auf das Strömungsfeld qualitativ beurteilen zu können, sind in Bild 4 die phasengemittelten Absolutgeschwindigkeitsfelder für 6 verschiedene Laufradpositionen ($\varphi = -10^\circ$, $\varphi = -4^\circ$, $\varphi = 0^\circ$, $\varphi = 4^\circ$, $\varphi = 10^\circ$, $\varphi = 26^\circ$) als Konturplots dargestellt. Die Anwesenheit der Diffusorbeschaufelung hat offensichtlich nur geringen Einfluss auf die Strömung innerhalb der Laufradbeschaufelung: Für alle gezeigten Positionen ist das Strömungsfeld im Laufrad sehr ähnlich. Dies wird durch den quantitativen Vergleich der Geschwindigkeiten an einer Linie am Laufradeintritt (Linie L1) und am Laufradaustritt (Linie L2, siehe auch Bild 3) in den Bildern 5 und 6 bestätigt. Auf der Abszisse ist der dimensionslose Abstand von der Druckseite zur Saugseite des Schaufelkanals aufgetragen. Dabei bedeutet $S = 0$ einen Wert an der Druckseite und $S = 1$ einen Wert an der Saugseite der Schaufel. Auf der Ordinate ist der Betrag der phasengemittelten Absolutgeschwindigkeit für die verschiedenen Laufradpositionen dargestellt. Am Laufradeintritt (L1) sowie am Laufradaustritt (L2) sind nur geringe Unterschiede der Geschwindigkeiten bei den verschiedenen Laufradpositionen feststellbar. In der Nähe des Laufradaustrittes ist für alle Laufradpositionen an der Saugseite eine Zone großer Absolutgeschwindigkeit vorhanden. Dies korrespondiert mit den geringen Relativgeschwindigkeiten, die in diesem Bereich festgestellt wurden.

Der Einfluss der Diffusorbeschaufelung auf das Strömungsfeld ist wesentlich deutlicher an einem Kreisbogen (Arc 1) zu erkennen, der zwischen Laufrad und Diffusor liegt. Die Absolutgeschwindigkeit variiert hier sehr stark mit der Laufradposition (Bild 7). Dies lässt den Rückschluss zu, dass die Diffusorbeschaufelung nur einen geringen Einfluss auf die Laufradströmung hat, aber das Strömungsverhalten nach Verlassen der Laufradbeschaufelung maßgeblich bestimmt.

Für die Diffusorbeschaufelung kann qualitativ betrachtet, unabhängig von der Laufradposition ein Staupunkt an der Schaufelvorderkante sowie eine Nachlaufdehle hinter der Hinterkante festgestellt werden. Das Feld hoher Geschwindigkeiten in der Nähe der Druckseite am Leitrad-eintritt wird mit Annäherung des Laufrades an die Leitradbeschaufelung kleiner und verschwindet bei der Laufradposition $\varphi = 4^\circ$, um nach dem Vorbeilaufen der Laufradschaukel an der Leitrad-schaukel wieder zu entstehen. Auch das Strömungsfeld an der Saugseite der Leitradbeschaufelung verändert sich erheblich in Abhängigkeit von der Laufradstellung. Dies weist auf die unterschiedlichen Zuströmbedingungen für die Diffusorbeschaufelung während des Vorbeilaufens des Laufrades hin. Innerhalb der Diffusorbeschaufelung wird das Strömungsfeld ebenfalls an je einer Auswertelinie kurz hinter dem Eintritt (L3) und kurz vor dem Austritt (L4) quantitativ ausgewertet. Auch hier sind die Beträge der Absolutgeschwindigkeiten entlang der Auswertelinie von der Druckseite zur Saugseite in den Bildern 8 und 9 aufgetragen. Bei beiden Darstellungen ist zu erkennen, dass je nach Laufradstellung zum Teil erhebliche Unterschiede zwischen den Geschwindigkeitsverteilungen bestehen. Damit wird deutlich, dass der Einfluss der Laufradströmung auf die Diffusorströmung wesentlich stärker ist, als die Rückwirkung der Diffusorströmung auf die Laufradströmung.

32.6

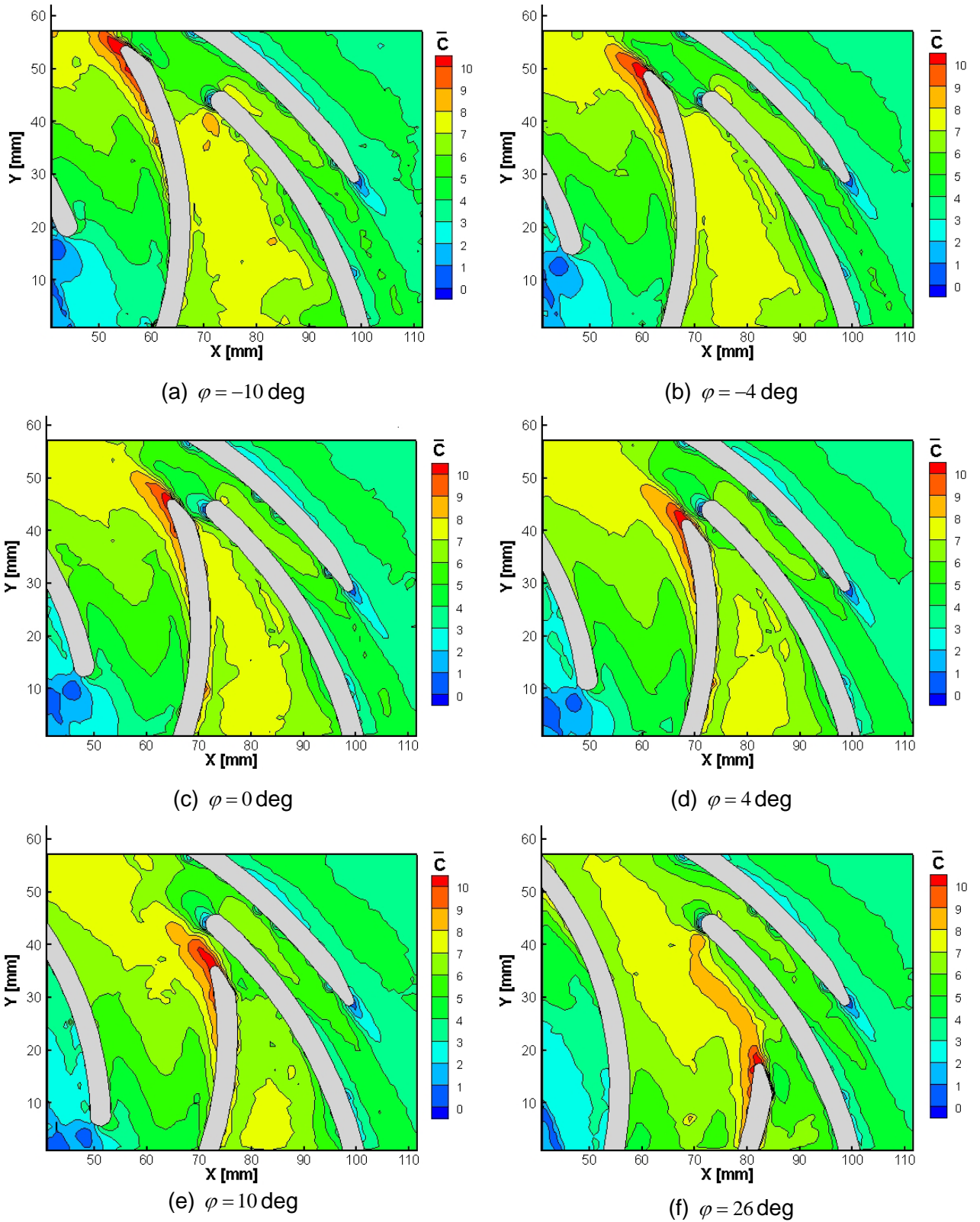


Bild 4: Phasengemittelte Absolutgeschwindigkeitsverteilungen für sechs verschiedene Laufradpositionen

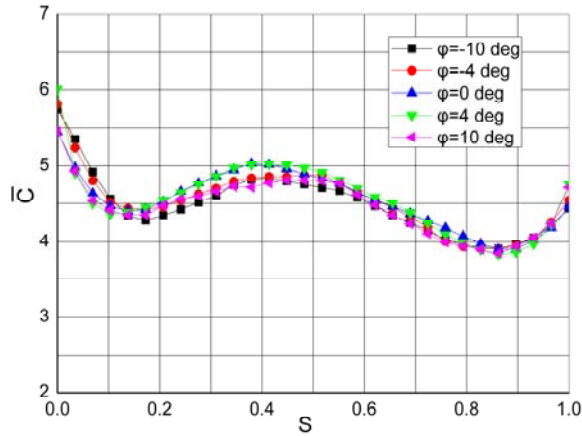


Bild 5: Beträge der Absolutgeschwindigkeiten an der Linie L1

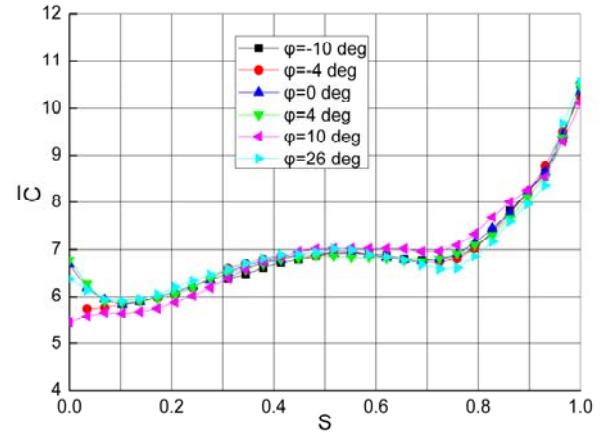


Bild 6: Beträge der Absolutgeschwindigkeiten an der Linie L2

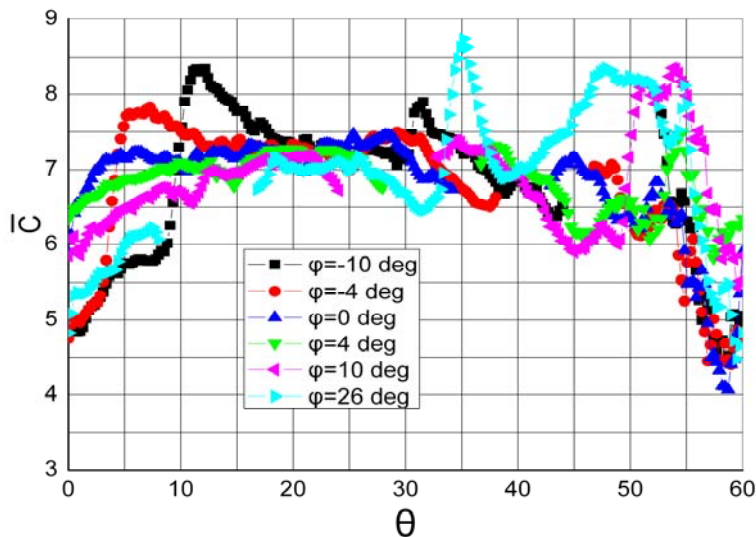


Bild 7: Verteilungen der Absolutgeschwindigkeiten in Umfangsrichtung zwischen Laufrad und Diffusor

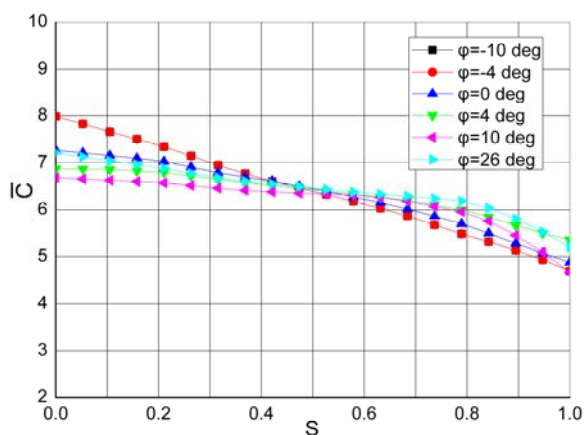


Bild 8: Beträge der Absolutgeschwindigkeiten an der Linie L3

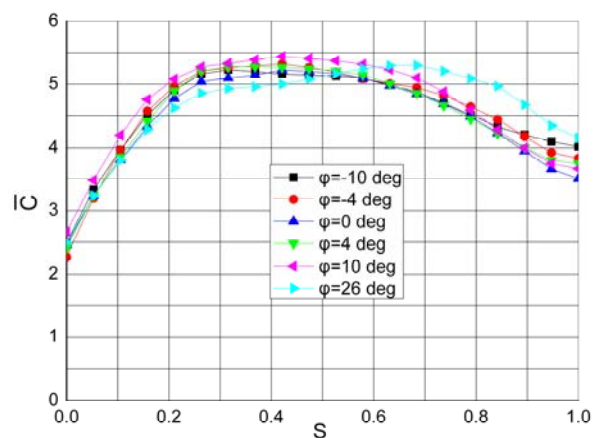


Bild 9: Beträge der Absolutgeschwindigkeit an der Linie L4

Zusammenfassende Bemerkungen

Die für diesen Beitrag mit der PIV-Methode durchgeführten Messungen des periodisch instationären Strömungsfeldes in einer radialen Kreiselpumpe kleiner spezifischer Drehzahl mit beschaukeltem Diffusor zeigen deutlich die durch die Relativbewegung zwischen Laufrad und Leitrad hervorgerufenen Strömungswechselwirkungen. Das phasengemittelte Strömungsfeld des Laufrades wird zwar nur geringfügig von der Diffusorströmung beeinflusst, jedoch am Laufradaustritt und in dem Radialspalt zwischen Laufrad und Diffusorbeschaukelung sind je nach Laufradstellung erhebliche Unterschiede in den Geschwindigkeitsverteilungen zu verzeichnen. Die Strömung innerhalb der Beschaukelung des Diffusors wird von der während des Vorbeilaufens des Laufrades veränderten Zuströmung erheblich beeinflusst. Je nach Laufradposition sind deutliche Unterschiede in den Strömungsgeschwindigkeiten am Eintritt und am Austritt der Diffusorbeschaukelung erkennbar.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich bei der Firma Dantec Dynamics, insbesondere bei den Herren Schledde, Dörner und Brämer für die kostenlose Leihgabe des für die Messungen eingesetzten Nd-YAG Lasers.

Nomenklatur

b	mm	Schaufelhöhe	U	m/s	Umfangsgeschwindigkeit
C	m/s	Absolutgeschwindigkeit	v	m/s	Komponente in y-Richtung
F	N	Kraft	W	m/s	Relativgeschwindigkeit
K	m ² /s ²	turbulente kinetische Energie	X	mm	x-Koordinate
n	min ⁻¹	Drehzahl	Y	mm	y-Koordinate
Q	m ³ /h	Volumenstrom	Z	-	Schaufelzahl
R	mm	Radius	φ	°	Drehwinkel
S	-	Dimensionslose Strecke	θ	°	Umfangskoordinate
t	s	Zeit	ω	s ⁻¹	Winkelgeschwindigkeit
u	m/s	Komponente in x-Richtung			

Indizes und hochgestellte Zeichen

1	Laufrad Eintritt	Aus	Auslegungspunkt
2	Laufrad Austritt	D	Diffusor
3	Diffusor Eintritt	L	Laufrad
4	Diffusor Austritt	R	Rückführkanal
5	Eintritt Rückführkanal	—	phasengemittelt
6	Austritt Rückführkanal	'	turbulent

Literaturangaben

- [1] Bert, P.F., Combes, J.F. and Kueny, J.L., 1996, "Unsteady flow calculation in a centrifugal pump using a finite element method," XVIII IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Cavitation, Valencia, Spain, September 16-19.
- [2] Ardizzone, G. and Pavesi, G., 2004, "Analysis of unsteady flow in a vaned diffuser radial flow pump," The 10th International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery, Honolulu, Hawaii, March 07-11.
- [3] Ardizzone, G. and Pavesi, G., 2004, "Analysis of unsteady impeller diffuser interaction in a centrifugal pump," 22nd IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems, Stockholm, Sweden, June 29 - July 2.
- [4] He, L. and Sato, K., 2001, "Numerical solution of incompressible unsteady flows in turbomachinery," ASME Journal of Fluids Engineering, 123, pp.680-685.
- [5] Benra F.-K. and Dohmen, H. J., 2005, "Numerical investigation of the transient flow in a centrifugal pump stage," 2005 ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting and Exhibition, Houston, TX, USA, June 19-23.

- [6] Akin, O. and Rockwell, D., 1994, "Flow structure in a radial flow pumping system using high-image-density particle image velocimetry," *ASME Journal of Fluids Engineering*, 116, pp.538–554.
- [7] Sinha, M. and Katz, J., 2000. "Quantitative visualization of the flow in a centrifugal pump with diffuser vanes. Part I: On flow structures and turbulence," *ASME Journal of Fluids Engineering*, 122, pp.97-107
- [8] Wuibaut, G., Bois, G., Dupont, P., Caignaert, G., and Stanislas, M., 2002, "PIV measurements in the impeller and the vaneless diffuser of a radial flow pump in design and offdesign operating conditions," *ASME Journal of Fluids Engineering*, 124, pp.791-797.
- [9] Wuibaut, G., Bois, G., Dupont, P., and Caignaert, G., 2002, "Rotor stator interactions in a vaned diffuser of a radial flow pump for different flow rates using PIV measurement technique," 9th International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery, Hawaii, USA, September 9-12.
- [10] Wuibaut, G., Dupont, P., Caignaert, G., and Bois, G., 2004, "Rotor stator interactions in a vaned diffuser radial flow pump," 22nd IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems, Stockholm, Sweden, June 29- July 2.