

PIV- UND LDV-MESSUNGEN IM BESCHAUFELTEN DIFFUSOR EINER RADIALEN KREISELPUMPE

F.-K. Benra, H. J. Dohmen
Universität Duisburg-Essen,
Fakultät für Ingenieurwissenschaften
Institut für Energie- und Umweltverfahrenstechnik
Strömungsmaschinen
Lotharstr. 1, 47057 Duisburg
O. Nowack
Ritz Pumpen
Becherlehenstr. 26, 73527 Schwäbisch Gmünd

Kurzfassung

Die Energiezufuhr im Laufrad einer Kreiselpumpe sorgt für eine Zunahme des Dralls und der Geschwindigkeit der Absolutströmung. Um die kinetische Energie der Strömung teilweise in statischen Druck umzuwandeln und den Drall wieder aus der Strömung zu entfernen, wird eine Leiteinrichtung verwendet. Bei mehrstufigen Pumpen folgt dem Laufrad zumeist ein beschauelter Radialdiffusor, bevor das Fluid um 180° umgelenkt und über eine Rückführbeschauelung der nächsten Pumpenstufe zugeführt wird. Die Strömung im beschauelten Diffusor ist äußerst komplex, da eine verzögerte Strömung leicht zur Ablösung neigt. Insbesondere bei vom Auslegungspunkt abweichenden Betriebsbedingungen sind starke Sekundärströmungen und Ablösungen zu erwarten.

Die heute verfügbaren Verfahren zur numerischen Simulation der Strömung in Kreiselpumpen sind in der Lage, die wesentlichen physikalischen Vorgänge zu beschreiben. Es treten jedoch häufig Schwierigkeiten bei detaillierter Betrachtung auf. Vor allem bei hoch belasteten Maschinen und bei extremen Betriebsbedingungen sind die numerischen Verfahren oft nicht in der Lage, das Strömungsfeld hinreichend genau zu beschreiben. Insbesondere größere Strömungsablösungen und die damit verbundenen Rückströmungen werden oft nur unzureichend wieder gegeben. In solchen Fällen sind experimentelle Untersuchungen unerlässlich. Die messtechnische Erfassung der Strömungsvorgänge mit optischen Messmethoden ist dabei von besonderem Vorteil, da sie die Strömung nicht beeinflussen.

In dem hier vorliegenden Konferenzbeitrag wird die Messung der Strömungsgeschwindigkeiten im beschauelten Diffusor einer radialen Kreiselpumpe in verschiedenen Betriebspunkten (Auslegung, Teillast und Überlast) beschrieben. Bei der Pumpe handelt es sich um eine Stufe einer kommerziell verfügbaren mehrstufigen Hochdruckpumpe, die in einem speziellen Prüfstands Aufbau mit den erforderlichen optischen Zugängen versehen wurde. Neben der detaillierten Erfassung der Strömungsgeschwindigkeiten in einem Schau felkanal des Radialdiffusors für ein umfangreiches Messraster mit dem LDV-Verfahren, wurde das Strömungsfeld in Teilbereichen des Schau felkanals auch mittels der PIV-Methode bestimmt. Die ermittelten Strömungsfelder zeigen die Details der komplexen Diffusorströmung einschließlich Ablösungen und Rückströmungen. Die Ergebnisse bieten sich zum Vergleich mit numerischen Berechnungen als auch zur Validierung von Simulationsverfahren an. Weiterhin können daraus Geometrievariationen abgeleitet werden, die Steigerungen des hydraulischen Wirkungsgrades zum Ziel haben.

Einleitung

Mehrstufige Kreiselpumpen werden eingesetzt, wenn Flüssigkeiten auf hohe Drücke gebracht werden müssen. Dies ist z. B. der Fall bei der Förderung von Grundwasser aus sehr großen Tiefen. Auch bei der Entwässerung von Bergwerken muss Wasser über große Höhendifferenzen gefördert werden. Da Flüssigkeiten in dem hier betrachteten Temperatur- und Druckbereich zu den dichtebeständigen Fluiden gezählt werden können, ändert sich ihr Volumen mit steigender Druckerhöhung nicht. Diese Tatsache ermöglicht die Reihenschaltung von identischen Pumpenstufen, um die gewünschte Förderhöhe zu erzielen. In **Abb. 1** ist beispielhaft eine 3-stufige Unterwassermotorpumpe in doppelflutiger Ausführung dargestellt. Derartige Pumpen werden bei extremen Anwendungen mit mehr als 10 Stufen gebaut. Begrenzt wird die Stufenzahl lediglich durch die rotordynamischen Eigenschaften, die im wesentlichen durch die Baulänge der Pumpe geprägt werden. Aus diesem Grunde ist es extrem wichtig, bei einem hohen hydraulischen Wirkungsgrad eine möglichst kleine Baulänge einer Stufe zu realisieren. Diese Auslegungsaufgabe ist äußerst komplex und erfordert umfangreiche Kenntnisse des Strömungsverhaltens in allen Komponenten einer Pumpenstufe. Während die Strömung in Laufrädern in der Vergangenheit intensiv numerisch und experimentell untersucht wurde, scheinen Strömungsuntersuchungen in Leitvorrichtungen ein wenig vernachlässigt worden zu sein (siehe [1-3]). Auch die Wechselwirkung der aus dem Laufrad austretenden Relativströmung mit den feststehenden Schaufeln des anschließenden Radialdiffusors ist für die Effizienz der Stufe von herausragender Bedeutung. Die Kenntnis dieser zeitabhängigen Strömungsverhältnisse ist deshalb besonders wichtig [4-5].

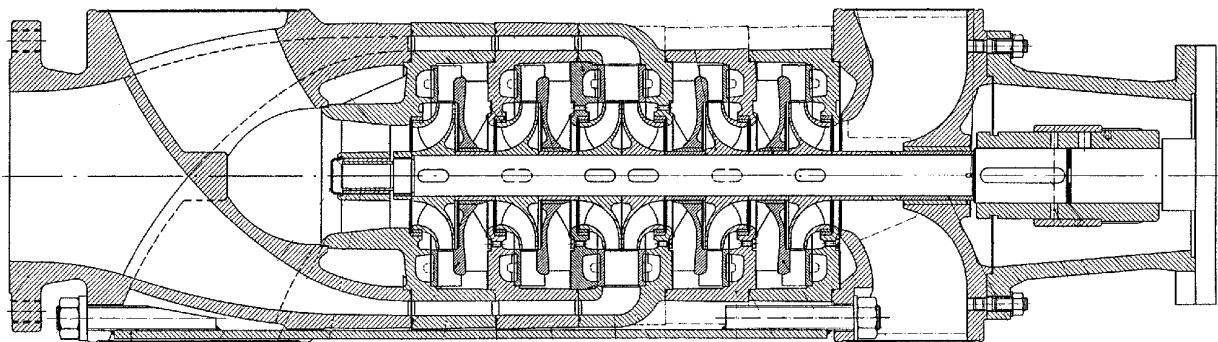


Abb. 1: 3-stufige doppelflutige Unterwassermotorpumpe (Ritz Pumpen, Schwäbisch Gmünd)

Analytische Untersuchungen der Strömung stoßen bei komplexen Geometrien schnell an ihre Grenzen. Sie sind wegen der Notwendigkeit, Vereinfachungen zur Lösung des Gleichungssystems einzuführen, zumeist nicht in der Lage, Aussagen mit genügender Genauigkeit zu liefern. Numerische Lösungen der Navier-Stokes Gleichungen hängen stark von der Güte des Rechengitters und von der Modellierung des turbulenten Strömungsverhaltens ab und müssen in jedem Fall validiert werden ([6,7]). Dazu bieten sich an erster Stelle experimentelle Untersuchungsmethoden an. Wegen ihrer Rückwirkungsfreiheit auf die Strömung sind optische Untersuchungsmethoden ganz besonders geeignet, die benötigten Informationen über wichtige Strömungsparameter zu verschaffen. Als äußerst wichtige Größen sind in diesem Zusammenhang die Strömungsgeschwindigkeiten zu nennen, die mittels LDV oder PIV bestimmt werden können [8-10].

Numerische Ermittlung der Strömungsgeschwindigkeiten

Die numerische Bestimmung der räumlichen, reibungsbehafteten Strömung in Kreiselpumpen ist mittlerweile Stand der Technik und kann mit kommerziellen Verfahren relativ einfach durchgeführt werden. In dem hier vorliegenden Fall wurde die Strömung einer kom-

pletten Stufe einer mehrstufigen Pumpe, bestehend aus einem Laufrad mit 7 Schaufeln, einem beschaukelten Diffusor und einer Rückführbeschaufelung mit jeweils 10 Schaufeln mittels des Navier-Stokes-Lösers CFX-5.6 berechnet. Von den verfügbaren Lösungsmöglichkeiten wurde eine stationäre Berechnung der Strömung mit einer bestimmten Stellung des Laufrades zur Diffusorbeschaufelung gewählt (frozen rotor). Die vernetzten Schaufelkanäle des Laufrades (ca. 250000 Knoten) wurden dafür in die gewünschte Stellung zum Schaufelkanal der Leiteinrichtung, bestehend aus beschaukeltem Diffusor und Rückführbeschaufelung mit jeweils 10 Schaufeln (ca. 335000 Knoten), gebracht.

Mit der Vorgabe der Randbedingungen am Eintritt in das Berechnungsgebiet (Saugdruck) und am Austritt aus dem Berechnungsgebiet (Massenstrom) lässt sich damit das Strömungsfeld berechnen. In **Abb. 2** sind beispielhaft für den Auslegungspunkt der Stufe die Relativgeschwindigkeiten im Laufrad und im beschaukelten Diffusor auf der mittleren Stromfläche dargestellt. Das Geschwindigkeitsfeld des Laufrades entspricht den Erwartungen, die an die Strömung im Auslegungspunkt geknüpft werden. Im Bereich der Druckseite der Schaufel sind die Strömungsgeschwindigkeiten deutlich geringer als in der Nähe der Saugseite, ohne Ablösungen und Rückströmungen zu zeigen.

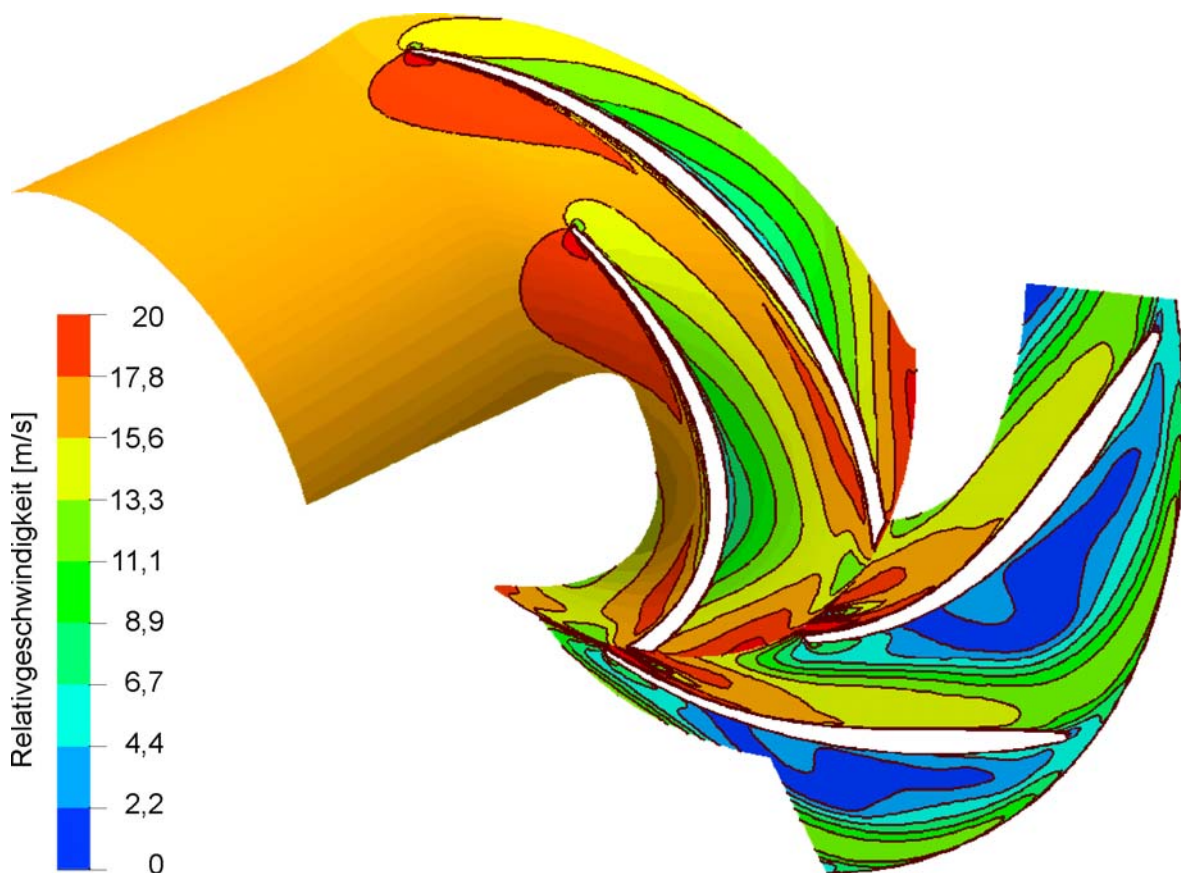


Abb. 2: Berechnetes Feld der Relativgeschwindigkeiten im Laufrad und im Radialdiffusor

Anders sieht es im beschaukelten Diffusor aus. An der Schaufelvorderkante ist eine deutliche Fehlanströmung zu erkennen. Die starke Verzögerung im Schaufelgitter ruft eine Ablösung der Strömung an der Druckseite des Schaufelprofils verbunden mit einer starken Wirbelströmung hervor. Die Ablösezone umfasst etwa die halbe Schaufelkanalbreite. In der anderen Hälfte des Schaufelkanals sind dagegen die Strömungsgeschwindigkeiten mit Werten über 10 m/s recht hoch. Die Strömung im Radialdiffusor scheint bei der betrachteten Laufradstellung im untersuchten Auslegungspunkt stark verlustbehaftet zu sein. Ob dies der Realität entspricht, soll auf experimentellem Wege durch optische Methoden belegt werden.

Experimentelle Ermittlung der Strömungsgeschwindigkeiten

Die experimentelle Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeiten im beschauften Diffusor der Kreiselpumpenstufe wird sowohl mit dem PIV-Verfahren als auch mit dem LDV-Verfahren durchgeführt. Um diese Messungen zu ermöglichen, müssen optische Zugänge zur Einbringung des Laserlichts in das Strömungsgebiet und zur Beobachtung der Strömung z. B. mit Kameras vorhanden sein. Die Realisierung dieser optischen Zugänge ist an kommerziellen mehrstufigen Pumpen äußerst schwierig. Eine Alternative ist aber ein Prüfstand für eine Pumpenstufe, in den die Komponenten kommerzieller Pumpen eingebaut und untersucht werden. In **Abb. 3** ist der Prüfstand mit sämtlichen Details im Schnitt dargestellt [11].

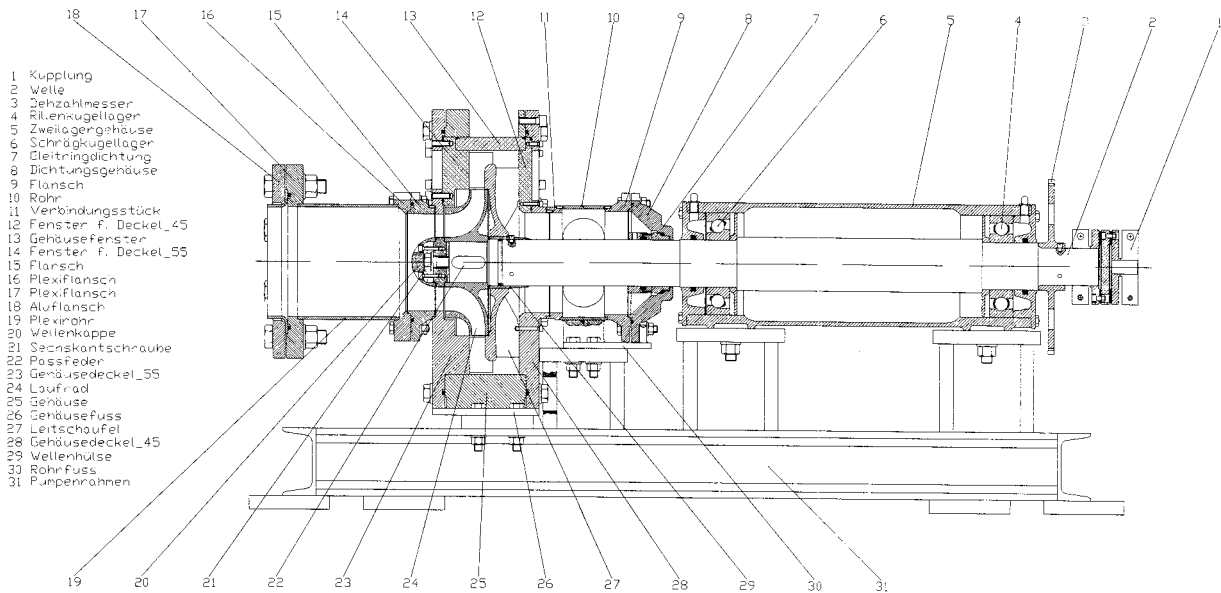


Abb. 3: Längsschnitt durch den Prüfstand für eine Pumpenstufe

Das Laufrad der zu untersuchenden Stufe wird durch ein gerades Rohr drallfrei angetrieben. Hinter dem Laufrad tritt die Strömung in einen beschauften Radialdiffusor ein. Hier soll durch Verzögerung der Strömung eine Umsetzung der kinetischen Energie in statischen Druck erfolgen. Nach der 180°-Umlenkung von der radialen Auswärtsrichtung in die

radiale Einwärtsrichtung wird in der Rückführbeschauftung der Drall aus der Strömung entfernt. Die Positionen 12 bis 14 stellen die in das Gehäuse eingebauten Fenster aus Plexiglas dar. Sie werden als optische Zugänge für Laser und Kameras genutzt.

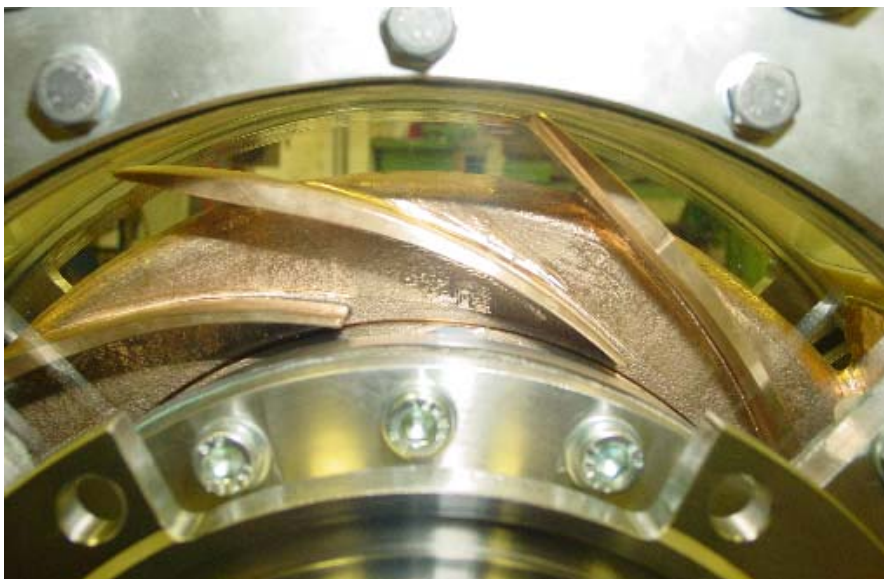


Abb. 4: Blick durch den optischen Zugang auf die Diffusorbeschauftung

In **Abb. 4** ist ein Teil des Stufengehäuses mit dem optischen Zugang zur Diffusorbeschauftung abgebildet. Etwa zwei komplette Schaufelka-

näle sind zu sehen. Für die Messung der Strömungsgeschwindigkeiten mittels des PIV-Verfahrens wird der Laserlichtschnitt durch das Fenster am Umfang des Gehäuses (Pos. 13 in Abb. 2) über einen Lichtarm eingeführt. Die Strömung wird durch das gezeigte Fenster mit einer digitalen Kamera (Dantec HiSense, 1280x1024 Pixel, 12 Bit Auflösung) erfasst.

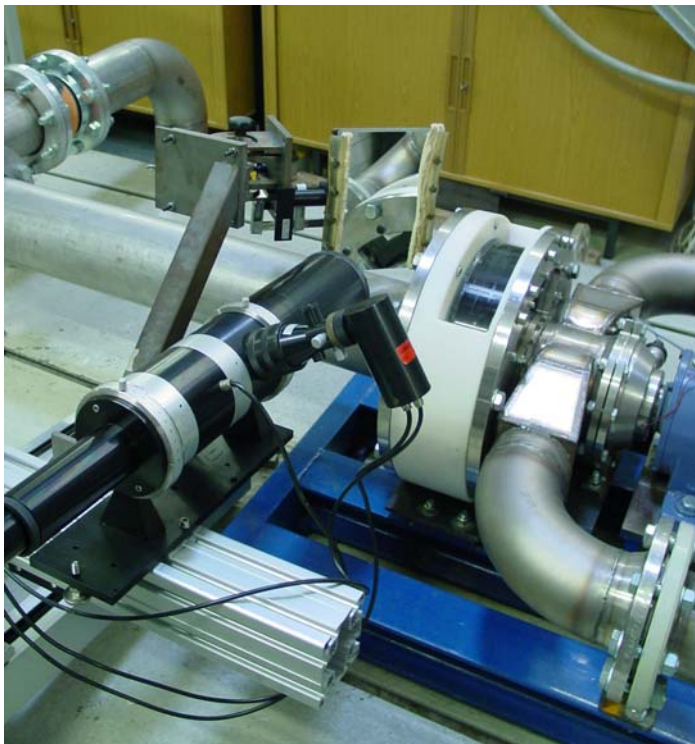


Abb. 5: Prüfstand mit LDV-Einrichtung und Traversierung

Bei der Messung mit dem LDV-Verfahren werden die Laserstrahlen über einen Spiegel in den betrachteten Schaufelkanal eingebracht und das Signal auf dem gleichen Weg über Rückwärtsstreuung ausgewertet. Die Anordnung der Laseroptik und des Umlenkspiegels geht aus der Fotografie in **Abb. 5** hervor.

Zu erkennen ist auch ein Teil der Traversiereinrichtung, mit der die Laseroptik zusammen mit dem Spiegel in zwei Ebenen verfahren werden kann. Die Auflösung dieser Traversiereinrichtung betrug $6,25 \mu\text{m}$ bei einer Wiederholbarkeit von $\pm 0,005/300 \text{ mm}$ Traversierlänge. Ausgehend von einem Kalibrierpunkt wurde damit das zuvor festgelegte Messraster zur Messung von zwei Strömungskomponenten abgefahren. Da das LDV-Verfahren eindimensional war und lediglich eine Strömungskomponente erfassen konnte, musste die zweite Geschwindigkeitskomponente durch

Drehen der Optik um 90° in einem zweiten Messdurchgang bestimmt werden. Wegen dieser nicht simultanen Erfassung von zwei Geschwindigkeitskomponenten ist eine drehwinkelabhängige Geschwindigkeitsmessung wenig sinnvoll. So wurde im vorliegenden Fall lediglich eine Ensemble-Mittelung aus 5000 Messwerten für beide Komponenten durchgeführt.

Ergebnisse der PIV-Messung

PIV-Verfahren sind in der Lage, zeitlich begrenzt auftretende, aperiodische Strömungsvorgänge aufzuzeichnen. Jede einzelne PIV-Aufnahme stellt eine Momentaufnahme

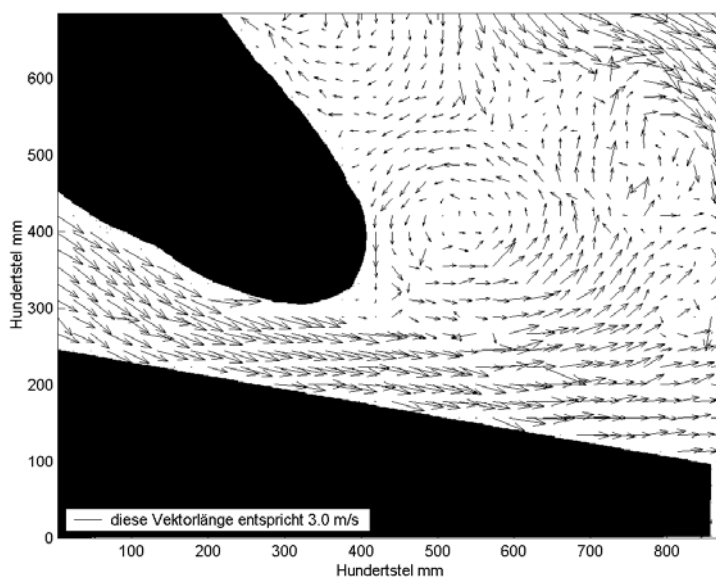


Abb. 6: Momentaufnahme der instationären Strömung

des betrachteten zeitlich instationären Strömungsfeldes dar. In **Abb. 6** sind die ermittelten Geschwindigkeitsvektoren in einem Teilbereich eines Diffusorschaufelkanals dargestellt. Diese Momentaufnahme wurde zu einem willkürlichen Zeitpunkt erstellt. Die Stellung des Laufrades in Relation zur Diffusorbeschaufelung ist nicht bekannt [12]. Die Abbildung zeigt einen Ausschnitt von etwa $8 \text{ mm} \times 7 \text{ mm}$ im Bereich einer Schaufelhinterkante bei halber Schaufelhöhe. Die Schaufel selbst und die Gehäusekontur wurden zur besseren Abgrenzung schwarz maskiert. Deutlich zu erkennen ist ein

ein System kleiner Wirbel an der Saugseite des Profils. An der Druckseite sind die Strömungsgeschwindigkeiten erheblich größer und es sind keinerlei Ablösungen zu erkennen.

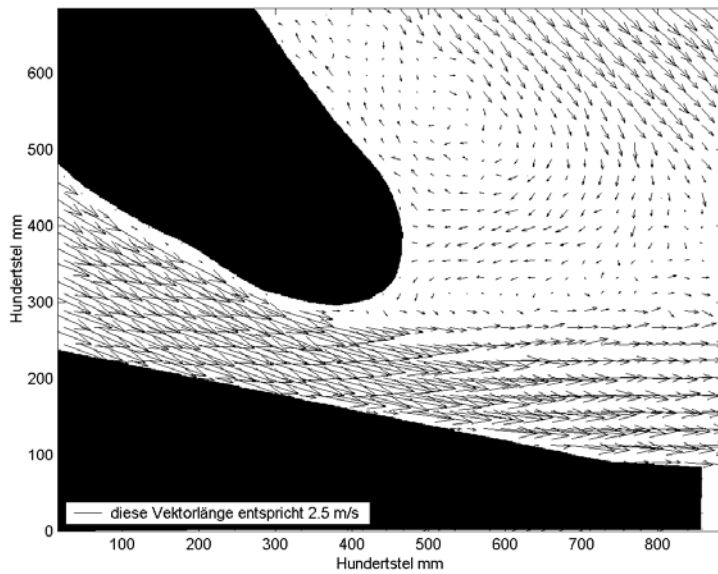


Abb. 7: Aus 50 Aufnahmen gemitteltes Strömungsbild

dass eine große Zahl von Bildern bei etwa der gleichen Laufradstellung aufgenommen wurden. Dadurch bleiben die Wirbelstrukturen erhalten, sind jedoch gegenüber der Einzelmessung deutlich abgeschwächt. Die Strömung entlang der Druckseite bestätigt dieses Verhalten. Da hier keine Wirbel auftreten, ist die Strömung annähernd stationär. Somit stellt die Mittelung vieler Messungen einen der instationären Strömung vergleichbaren Zustand dar.

Bei diesen Messungen wurden VESTOSINT-Partikel der Firma Degussa als Seeding verwendet. Es handelt sich dabei um Polyamidkugeln mit einem mittleren Durchmesser von $30 \mu\text{m}$. Die Betriebsdaten der Pumpe waren bei einer Drehfrequenz von $n = 20 \text{ Hz}$ ein Volumenstrom $Q = 112 \text{ m}^3/\text{h}$ und eine Druckerhöhung von $\Delta p = 2,6 \text{ bar}$.

Ergebnisse der LDV-Messung

Die Strömungsuntersuchung mit dem LDV-Verfahren wurde ohne Zusatz von Seeding-Partikeln durchgeführt. Wegen der erheblichen Abmessungen der Laseroptik konnte nur etwa die äußere Hälfte des Strömungskanals erfasst werden. Aus Zeitgründen wurde zu-

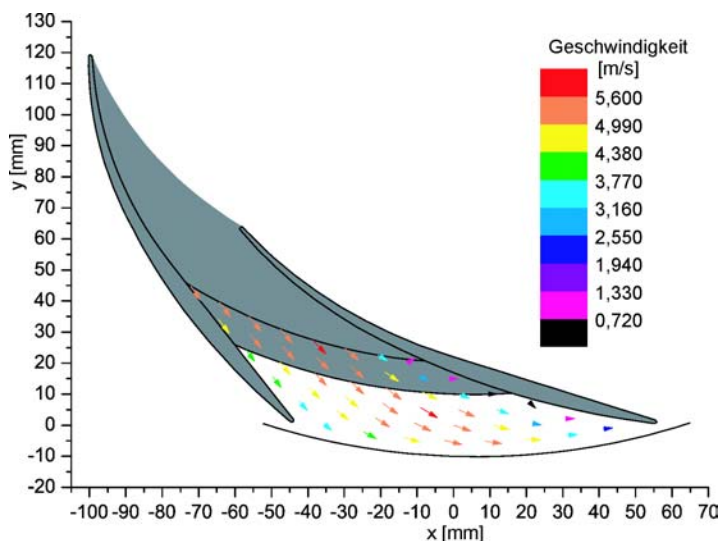


Abb. 8: Geschwindigkeiten im Mittelschnitt; $n = 20 \text{ Hz}$, $Q = 112 \text{ m}^3/\text{h}$

Die Mittelung einer großen Anzahl von Aufnahmen ergibt ein virtuelles Bild einer quasi stationären Strömung. Diese Strömung kommt in der Realität nicht vor, wird aber bei stationären CFD-Lösungen erzielt. Insofern ist zu mindest eine Vergleichsmöglichkeit gegeben. In **Abb. 7** ist eine derartige statistische Auswertung von 50 instationären Messungen dargestellt. Es sind noch leichte Wirbelstrukturen im Bereich der Saugseite zu erkennen. Dies ist damit zu erklären, dass während der Messungen die Wirbel zeitlich nicht stabil sind. Da die Aufnahmen mit einer festen Frequenz erfolgten, kann erwartet werden,

nächst ein relativ grobes Messraster gewählt. Ein Betriebspunkt der Pumpe, für den LDV-Messungen durchgeführt wurden, entsprach exakt den Daten, für die bereits vorher PIV-Messungen erfolgten. Die Ergebnisse dieser Messung sind in **Abb. 8** dargestellt. In der Nähe der Druckseite der Schaufel sind die Geschwindigkeiten wesentlich kleiner als in der Nähe der Saugseite. Ein direkter Vergleich mit der PIV-Messung ist wegen des sehr groben Messrasters nicht möglich. Dazu muss das Messraster deutlich verfeinert, bzw. der Bildausschnitt der PIV-Messung wesentlich vergrößert werden. Erkenn-

bar ist jedoch, dass es im Bereich der Druckseite offensichtlich Bereiche mit Geschwindigkeiten um den Wert 0 m/s gibt. Dies deutet auf mögliche Ablösungen und Wirbelstrukturen hin.

Im Verlauf der Untersuchungen wurden weitere Betriebspunkte angefahren. Ziel war es, den Auslegungspunkt der Stufe zu erreichen, da für diesen Punkt auch eine CFD-Lösung vorlag (s. Abb. 2). Aus diesem Grunde wurde die Drehzahl der Pumpe bei gleicher Drosselstellung gesteigert. In den **Abb. 9 und 10** sind die Messergebnisse für die Drehfrequenzen $n = 26$ Hz und $n = 36,8$ Hz dargestellt. Der Auslegungspunkt bei der Nennfrequenz $n = 50$ Hz konnte wegen auftretender Undichtigkeiten der optischen Zugänge bisher nicht gefahren werden.

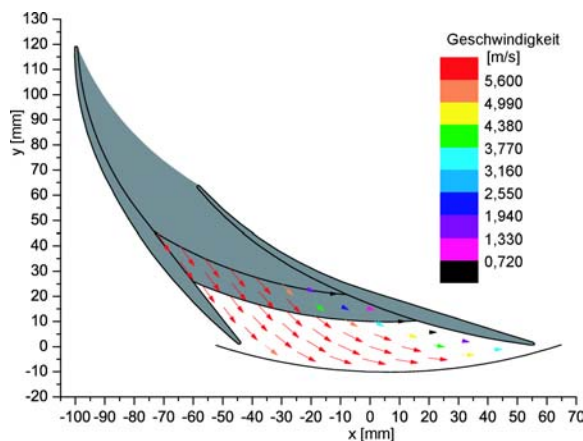


Abb. 9: Geschwindigkeiten im Mittelschnitt;
 $n = 26$ Hz, $Q = 168$ m³/h

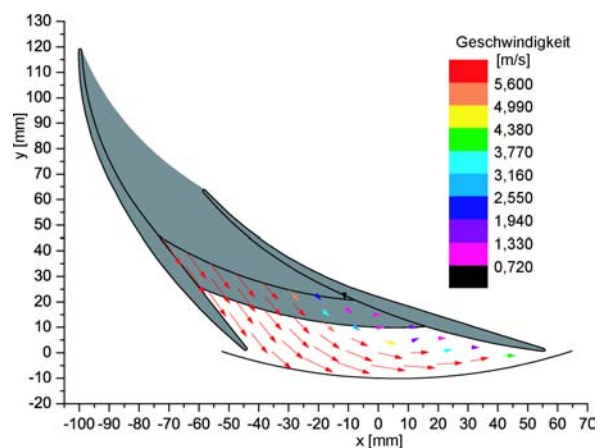


Abb. 10: Geschwindigkeiten im Mittelschnitt;
 $n = 36,8$ Hz, $Q = 225$ m³/h

Der Volumenstrom der Pumpe erhöhte sich bei der Drehzahlsteigerung von $Q = 168$ m³/h auf $Q = 225$ m³/h, dem Auslegungswert. Mit Hilfe der Ähnlichkeitsgesetze lässt sich zeigen, dass beide Betriebspunkte Überlastpunkte auf der jeweiligen Drehzahlkennlinie sind. Das Strömungsbild ist aus diesem Grund relativ ähnlich. Im Bereich der Saugseite treten die höchsten Geschwindigkeiten auf, während in der Nähe der Druckseite Geschwindigkeiten um den Wert 0 m/s ermittelt wurden. Vergleicht man die Strömungsfelder aller drei dargestellten Betriebspunkte untereinander, lässt sich mit steigender Drehfrequenz eine generelle Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeiten und eine zunehmende Ablenkung in Umfangsrichtung feststellen. Ein erster Vergleich mit der CFD-Lösung des Auslegungspunktes (Abb. 2) zeigt eine qualitativ gute Übereinstimmung. Der Bereich niedriger Geschwindigkeiten in der Nähe der Druckseite wird durch die LDV-Messungen bestätigt.

Zusammenfassung

In diesem Beitrag wird die Messung der Strömungsgeschwindigkeiten im beschaufelten Radialdiffusor einer kommerziellen Kreiselpumpe mit optischen Methoden beschrieben. Da das Einbringen optischer Zugänge in handelsüblichen mehrstufigen Unterwassermotorpumpen nicht möglich ist, wurde eine Stufe einer derartigen Pumpe in einem speziellen Prüfstands Aufbau eingesetzt und durch den Einbau von Plexiglasfenstern für die Untersuchungen vorbereitet. Anschließend wurden Messungen mit dem PIV- und mit dem LDA-Verfahren in mehreren Betriebspunkten durchgeführt.

Die Ergebnisse der PIV-Messungen zeigen, dass es möglich ist, zeitabhängige Strömungsvorgänge in der Pumpenstufe durch Momentaufnahmen zu erfassen. Insbesondere die zu erwartenden periodisch auftretenden Ereignisse können bei geeigneter Triggerung der Messeinrichtung auch statistisch ausgewertet werden. Dies lässt sich durch eine auf den Laufraddrehwinkel bezogene Aufnahmetechnik erreichen. Die Ensemble-Mittelung der LDV-Messung erfordert gerade zu eine drehwinkelkorrelierte Messdatenaufnahme, um aussagefähige Ergebnisse für die periodisch auftretenden Strömungsvorgänge liefern zu können.

Ein erster Vergleich mit den Ergebnissen einer numerischen Berechnung des Strömungsfeldes in der Pumpenstufe zeigt eine tendenzielle Übereinstimmung sowohl in qualitativer als auch in quantitativer Hinsicht für beide Messverfahren. Die Kombination numerischer Verfahren mit den beschriebenen experimentellen Methoden scheint bei Verwendung drehwinkelbezogener Aufnahmetechnik geeignet, die benötigten Ergebnisse für die geplanten Untersuchungen zur Rotor-Stator-Wechselwirkung in Kreiselpumpenstufen zu liefern.

Danksagung

Die für die experimentellen Untersuchungen verwendeten Pumpenkomponenten (Laufrad, beschaufelter Diffusor und Rückführbeschaufelung) wurden von der Firma Ritz Pumpen, Schwäbisch Gmünd kostenlos zur Verfügung gestellt. Für die Bereitstellung dieser Bauteile einschließlich der Konstruktionsdaten und für die Erlaubnis zur Veröffentlichung von Messdaten bedanken sich die Autoren recht herzlich.

Literatur

- [1] Eisele, K., 1994: "Improving Pump Development with Laser and Computer", Chemical Technology Europe, November/December
- [2] Parrondo-Gayo, J. L., Gonzalez-Perez, J., Fernandez-Francos, J., Fernandez-Arango, L., 2000: "An Experimental Study on the Unsteady Pressure Distribution around the Impeller Outlet of a Centrifugal Pump", Proceedings of ASME FEDSM'00, Boston, Massachusetts
- [3] Benra, F.-K., Dohmen, H. J., Schneider, O., Sommer, M., 2002: "Strömungsgeschwindigkeitsmessung mit der Particle-Image-Velocimetry in einer Kreiselpumpenrückführstufe", GALA 2002, Rostock
- [4] Arndt, N., Acosta, A. J., Brennen, C. E., Caughey, T. K., 1990: "Experimental Investigation of Rotor-Stator Interaction in a Centrifugal Pump with Several Vaned Diffusors", Transactions of the ASME Vol. 112, January 1990
- [5] Aysheshim, W., Stoffel, B., 2002: "Rotor-Stator-Interaction and Turbulence in a Centrifugal Pump Stage", Proceedings of the XXIst IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems, Lausanne, Switzerland
- [6] Schachenmann, A., Gülich, J. F., 1992: "Vergleich von drei Navier-Stokes Berechnungsverfahren mit LDA-Messungen an einem radialen Pumpenlaufrad", Pumpentagung Karlsruhe, B 7-02
- [7] Combes, J. F., Rieutord, E., 1992: "Numerical and Experimental Analysis of the Flow in a Centrifugal Pump at Nominal and Partial Flow Rate", ASME 92-GT-284, Cologne, Germany
- [8] Miner, S. M., Beaudoin, R. J., Flack, R. D., 1989: "Laser Velocimeter Measurements in a Centrifugal Flow Pump", Journal of Turbomachinery, Vol. 111, July 1989
- [9] Szabo, S., Kecke, H. J., 2001: "Experimentelle Bestimmung der Geschwindigkeitsverteilung in einem strömungsmaschinen-typischen Kanal mittels Laser-Doppler-Velocimetry (LDV)", Technisches Messen 68/3
- [10] Wuibaut, G., Bois, G., Dupont, P., Caignairt, G., Stanislas, M., 2002: "PIV Measurements in the Impeller and the Vaneless Diffusor of a Radial Flow Pump in Design and Off-Design Operating Conditions", Journal of Fluids Engineering, Vol. 124, September 2002
- [11] Wenzel, M., 2001: "Konstruktion eines Rückführkanalprüfstandes", Studienarbeit an der Gerhard-Mercator-Universität Duisburg, Fachgebiet Strömungsmaschinen
- [12] Sommer, M., 2002: "Particle Image Velocimetry in einer Kreiselpumpenrückführstufe", Diplomarbeit Gerhard-Mercator-Universität Duisburg, Fachgebiet Strömungsmaschinen