

Untersuchung der rotierenden Abreißströmung in einem rotierenden radialen Pumpenlaufrad mittels zeitaufgelöster PIV

Elemér Pap, Nico Krause, Katharina Zähringer

Otto – von – Guericke - Universität Magdeburg, Institut für Strömungstechnik und Thermodynamik, Lehrstuhl für Strömungsmechanik und Strömungstechnik
PSF 4120, 39016 Magdeburg

1. Einleitung

Eine Strömungsarbeitsmaschine wird nicht nur in ihrem Auslegungspunkt sondern in einem weiten Arbeitsbereich betrieben. Dieser Betriebsbereich wird in Richtung Teillast durch eine stark ausgeprägte Instabilität der Strömung in den strömungsführenden Teilen der Maschine (Laufrad, Leiteinrichtung) begrenzt. Die bei diesem Betriebszustand vorhandenen Wirbel in der Strömung und das Abreißen der Grenzschicht an den Wänden der strömungsführenden Teile verursachen starke periodische Druckschwankungen, die die Funktionsfähigkeit der Maschine beeinträchtigen. Diese Erscheinungen treten sowohl bei axialen als auch bei radialen Strömungsarbeitsmaschinen auf. Ab einem bestimmten Mindestvolumenstrom entstehen in den strömungsführenden Teilen Zellen mit starken Wirbeln und Grenzschichtablösungen, die in Umfangsrichtung umlaufen. Diese rotierenden Abreißströmungszellen (rotating stall) bewirken eine periodisch schwankende, nicht rotationssymmetrische Druckverteilung in der Maschine. Aus dieser Druckverteilung resultieren Kräfte, die unerwünschte Schwingungen verursachen. Das Erscheinungsbild der Strömungsinstabilitäten in einer im Teillastbereich betriebenen Turbomaschine ist von einer großen Anzahl von Parametern abhängig. Durch das örtlich und zeitlich rasch veränderliche Geschwindigkeitsfeld und durch die Vielzahl der Parameter wird nicht nur das physikalische Modellieren und die mathematische Beschreibung sondern auch die experimentelle, messtechnische Erfassung der Strömungsvorgänge in einer Strömungsarbeitsmaschine im Teillastbereich erschwert. Seit der Veröffentlichung der bis heute umstrittenen klassischen Theorie zur rotierenden Ablösung von Emmons [1] wurden zahlreiche Arbeiten theoretischer und experimenteller Natur über Strömungsinstabilitäten von in Teillast betriebenen Strömungsarbeitsmaschinen veröffentlicht. Sehr gute Zusammenstellungen der diesbezüglichen Literatur sind in [2] und [3] zu finden.

Es ist leicht einzusehen, dass für die störungsfreie messtechnische Untersuchung eines instabilen, zeitlich und räumlich rasch veränderlichen Strömungsfeldes ein berührungsfreies Vollfeld-Geschwindigkeitsmessverfahren verwendet werden sollte. Die Digital Particle Image Velocimetry (DPIV) stellt eine besonders effektive Möglichkeit für die Untersuchung von Strömungsfeldern und zur Validierung von Rechenergebnissen, die mit verschiedenen CFD-Rechenverfahren erzielt wurden, auch bei rotierenden radialen Pumpenlaufrädern dar. Das laseroptische Vollfeld-Strömungsmessverfahren DPIV gestattet die quantitative Erfassung der Geschwindigkeitsvektorverteilung in einem Strömungsfeld zu *einem Zeitpunkt*. Die zeitliche Auflösung dieser Messmethode, d.h. die Anzahl der Messvorgänge je Zeiteinheit war bis vor kurzem verhältnismäßig niedrig, sie betrug 3 bis 7,5 Hz [4], [5], [6], [7], [8], so dass die schnellen Geschwindigkeitsänderungen in einem wirbelbehafteten, instabilen Strömungsfeld mit ihr nicht verfolgt werden konnten. Wernet [9] triggerte mit Signalen, die von Drucksensoren aus dem instationären Druckfeld beim instabilen Betriebszustand eines radialen Laufrades geliefert wurden, eine Standard - PIV Messeinrichtung, um vermutete Rückströmeffekte in den Schaufelkanälen des Laufrades in diesem Betriebszustand zu untersuchen. Auch mit dieser Methode konnten die zeitlich schnell veränderlichen Effekte im Strömungsfeld der Lauf

radkanäle quantitativ nicht erfasst werden, weil es nicht gelungen ist, PIV - Aufnahmen im richtigen Zeitpunkt auszulösen.

In der vorliegenden Arbeit wird über die Anwendung der zeitaufgelösten PIV zur Untersuchung der rotierenden Abreißströmung in den Schaufelkanälen von einem rotierenden radialen Pumpenlaufrad berichtet.

2. Die rotierende Abreißströmung (rotating stall)

Zur Beurteilung der Strömungsverhältnisse in den Schaufelkanälen der rotierenden Laufräder

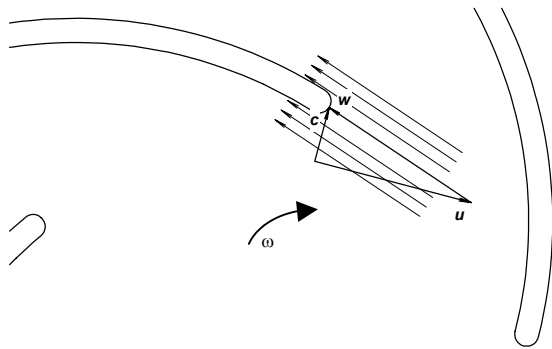


Bild 1 Schaufelanströmung beim Nennvolumenstrom

Anströmrichtung der Relativgeschwindigkeit w keine Grenzschichtablösung an den Schaufeln hervorruft, wie im **Bild 1** schematisch dargestellt wird. Im **Bild 2** wird die mit einem Standard - PIV Meßsystem ermittelte Geschwindigkeitsverteilung in einem Segment einer im Auslegungspunkt betriebenen Radialpumpe gezeigt. Im Laufradkanal ist das Feld der zeitlich gemittelten Vektoren der Relativgeschwindigkeit und außerhalb des Laufradkanals das zeitlich

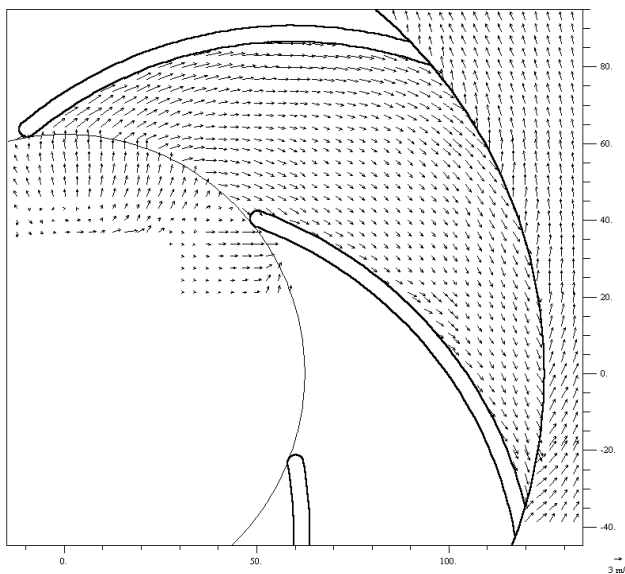


Bild 2 Gemessene Geschwindigkeitsverteilung beim Nennvolumenstrom

gemittelte Absolutgeschwindigkeitsfeld zu sehen. Wenn durch Drosselung der Fördervolumenstrom verringert wird, verkleinert sich die Absolutgeschwindigkeit c am Eintritt in den Schaufelkanal, und bei einer unveränderten Winkelgeschwindigkeit ω des Laufrades ändert sich auch der Winkel, unter dem die Relativgeschwindigkeit w die Laufradschaufel anströmt, wie im **Bild 3** zu sehen ist. Diese Richtungsänderung der Relativgeschwindigkeit w entspricht einer Vergrößerung des Schaufelstellwinkels, und die Grenzschicht löst sich an der Schaufelaußenseite ab. Die reguläre Durchströmung des Laufradkanals und damit die Energieübertragung werden durch starke Wirbelbildung gestört. Das **Bild 4**

zeigt die mit einem Standard - PIV Meßsystem ermittelte Geschwindigkeitsverteilung in

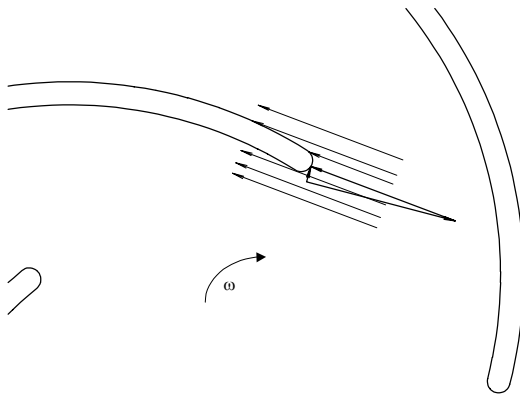


Bild 3 Schaufelanströmung bei Teillast

Stauung wird unter einem vergrößerten Anstellwinkel

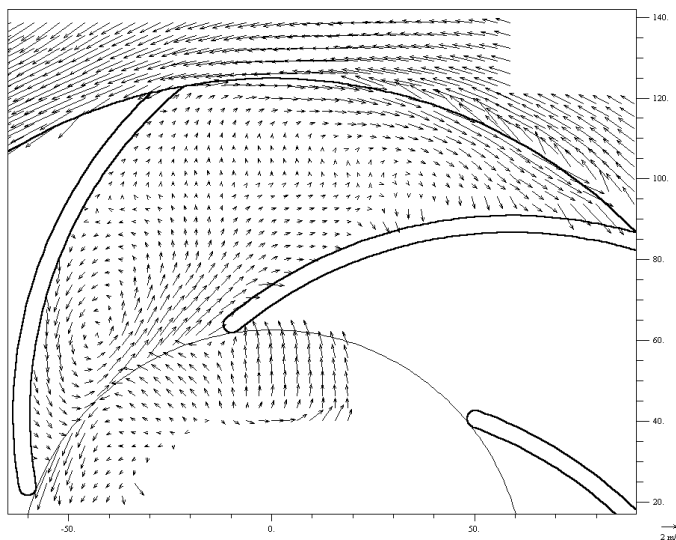


Bild 4 Gemessene Geschwindigkeitsverteilung bei Teillast

einem Laufradkanal bei Teillast. Auch hier stellen die Geschwindigkeitsvektoren zeitliche Mittelwerte dar. Die Datenerfassungsfrequenz betrug ca. 1 Hz, so dass der stark instationäre Charakter der Strömung im Bild 4 nicht erkennbar ist. Die Wirbel können solche Ausmaße annehmen, dass der gesamte Kanalquerschnitt durch sie blockiert wird. Durch diese „Verstopfung“ eines Schaufelkanals werden auch die Zuströmbedingungen für die benachbarten Schaufelkanäle geändert. Die Schaufel hinter der Stauung wird unter einem vergrößerten Anstellwinkel angeströmt. Dadurch weist diese Schaufel eine Ablösung auf. Dagegen strömt das Fördermedium zu der Schaufel, die sich in Drehrichtung vor dem blockierten Schaufelkanal befindet, unter einem verkleinerten Anstellwinkel, wodurch an dieser Schaufel eine Ablösung verhindert wird. Auf diese Weise kann sich die Ablösungszelle entlang der Laufradbeschaufelung in die der Laufraddrehrichtung entgegengesetzte Richtung wandern. Vom ruhenden Koordinatensystem betrachtet ist die Winkelgeschwindigkeit der rotierenden Ablösungszelle kleiner als die Winkelgeschwindigkeit des rotierenden Laufrades.

3. Versuchstand und Versuchsdurchführung

Die Untersuchungen wurden in dem Laufrad einer transparenten radialen, einstufigen und einflutigen Kreiselpumpe durchgeführt. Das Laufrad ist im **Bild 5** dargestellt. Um rotations-symmetrische Strömungsbedingungen am Laufradumfang zu erreichen, wurde die Nachleiteeinrichtung im Pumpengehäuse als parallelwandiger Ringraum mit 12 symmetrisch angeordneten achsparallelen Abflußkanälen ausgebildet. Der Aufbau des Versuchstandes ist im **Bild 6** zu sehen. Es handelt sich um einen offenen Kreislauf, der allerdings durch eine drehzahlregelbare Zubringerpumpe mit zusätzlichem Bypass in der Saugleitung die Einstellung eines betriebspunktunabhängigen, konstanten $NPSH_{vorh}$ – Wertes gestattet. Der Antrieb erfolgte durch einen Drehstromsynchronmotor bei einer konstanten Drehzahl von 600 min^{-1} (10 Hz).

Das verwendete PIV – System für Geschwindigkeitsfeldmessungen mit hoher zeitlicher Auflösung unterscheidet sich nicht in seiner prinzipiellen Zusammensetzung von dem Standard –

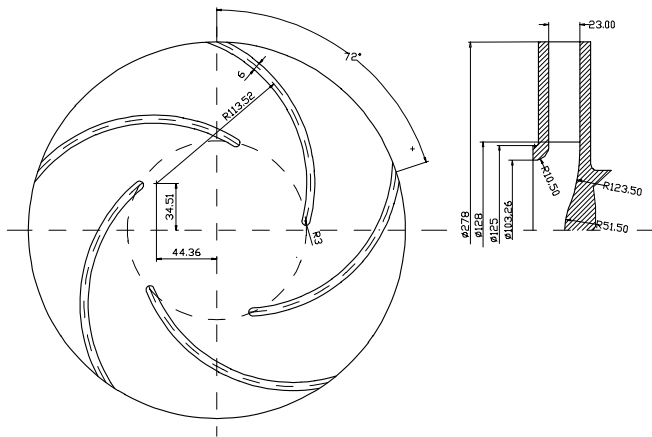


Bild 5 Das Laufrad

sierung der optimalen Lichtführung vom Laser zur Lichtschnittoptik wurde durch einen beweglichen Arm gewährleistet. Durch die Lichtschnittoptik wurde der eingekoppelte Laserstrahl in einen, sich mit dem

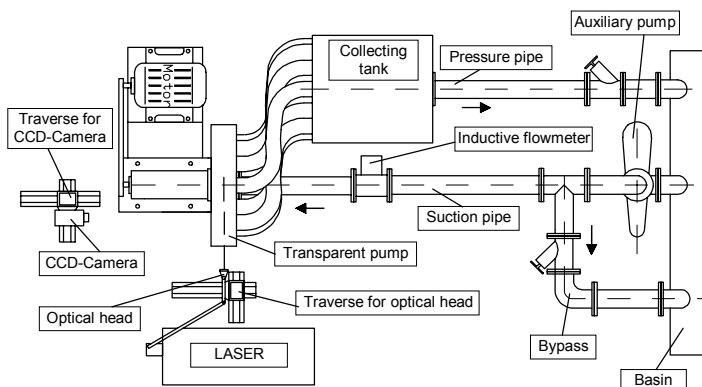


Bild 6 Versuchsstand

Öffnungswinkel von ca. 14° erweiternden Lichtschnitt umgewandelt. Zur Aufzeichnung der Partikelbilder wurde eine 8 bit CMOS Videokamera mit einer Auflösung von 1280×1024 Pixel verwendet. Bis zu einer Doppelbildfrequenz von 250 Hz ist diese Auflösung nutzbar, darüber hinaus nimmt die Pixelzahl je Bild mit zunehmender Doppelbildfrequenz ab. Die Videokamera mit einem Objektiv von der Brennweite von 500 mm wurde mit ihrer optischen Achse senkrecht auf die Lichtschnittebene ausgerichtet. Die Lichtschnittoptik und die Videokamera wurden mit Hilfe von Traversiereinrichtungen so justiert, dass das Geschwindigkeitsfeld im Schaufelkanal des rotierenden Laufrades in der mittleren, auf der Laufradachse senkrechten Ebene untersucht werden konnte. Als Tracer wurden mit Rhodamin B gefärbte, fluoreszierende Partikel mit einem mittleren Durchmesser von $5,3 \mu\text{m}$ verwendet. Diese Partikel strahlen durch die Erregung des Laserlichtes ein Licht mit der Wellenlänge 590 nm ab. Durch die Verwendung eines Kantenfilters als Langpaßfilter am Objektiv der Videokamera konnten die Störungen durch die Reflexion des Laserlichtes bei der Wellenlänge von 532 nm verhindert werden.

Die Triggerung des Meßvorganges erfolgte durch eine Scheibe, die an der Welle des Antriebsmotors befestigt war und je Laufradumdrehung fünf Triggersignale lieferte. Diese Signale lösten den Vorgang für die Doppelbildaufnahme aus. Die Triggerscheibe war so justiert, dass die für die Strömungsfelduntersuchung notwendigen Doppelbilder von den fünf einzelnen Schaufelkanälen des Laufrades bei dem gleichen Drehwinkel hintereinander aufgenommen werden konnten.

PIV System. Als Lichtquelle diente ein diodengepumpter, Q-geschalteter Nd:YAG Laser. Die Wiederholfrequenz der Doppelpulse konnte in einem Bereich von 15 Hz bis 2000 Hz kontinuierlich durch Triggerung eingestellt werden. Die Impulsenergie hing von der Impulsfrequenz ab, sie betrug nach Herstellerangabe bei der Doppelbildfrequenz von 2000 Hz ca. $2 \times 12,5 \text{ mJ}$. Die Pulsabstände und damit die Zeitabstände zwischen den Doppelaufnahmen konnten zwischen 40 und $1000 \mu\text{s}$ bei einer Pulsdauer zwischen $75 - 250 \text{ ns}$ variiert werden. Die Realisierung

der optimalen Lichtführung vom Laser zur Lichtschnittoptik wurde durch einen beweglichen Arm gewährleistet. Durch die Lichtschnittoptik wurde der eingekoppelte Laserstrahl in einen, sich mit dem Öffnungswinkel von ca. 14° erweiternden Lichtschnitt umgewandelt. Zur Aufzeichnung der Partikelbilder wurde eine 8 bit CMOS Videokamera mit einer Auflösung von 1280×1024 Pixel verwendet. Bis zu einer Doppelbildfrequenz von 250 Hz ist diese Auflösung nutzbar, darüber hinaus nimmt die Pixelzahl je Bild mit zunehmender Doppelbildfrequenz ab. Die Videokamera mit einem

Für die Auswertung der PIV – Aufnahmen wurde die Software FlowManger der Firma Dantec verwendet. Für die Kreuzkorrelation wurde eine Auswertefläche von 32×32 Pixeln mit einer Überlappung von 50% gewählt. Fehlerhafte Vektoren wurden durch peak, moving average und range validation ermittelt und eliminiert. Sie wurden nicht ersetzt.

4. Ergebnisse

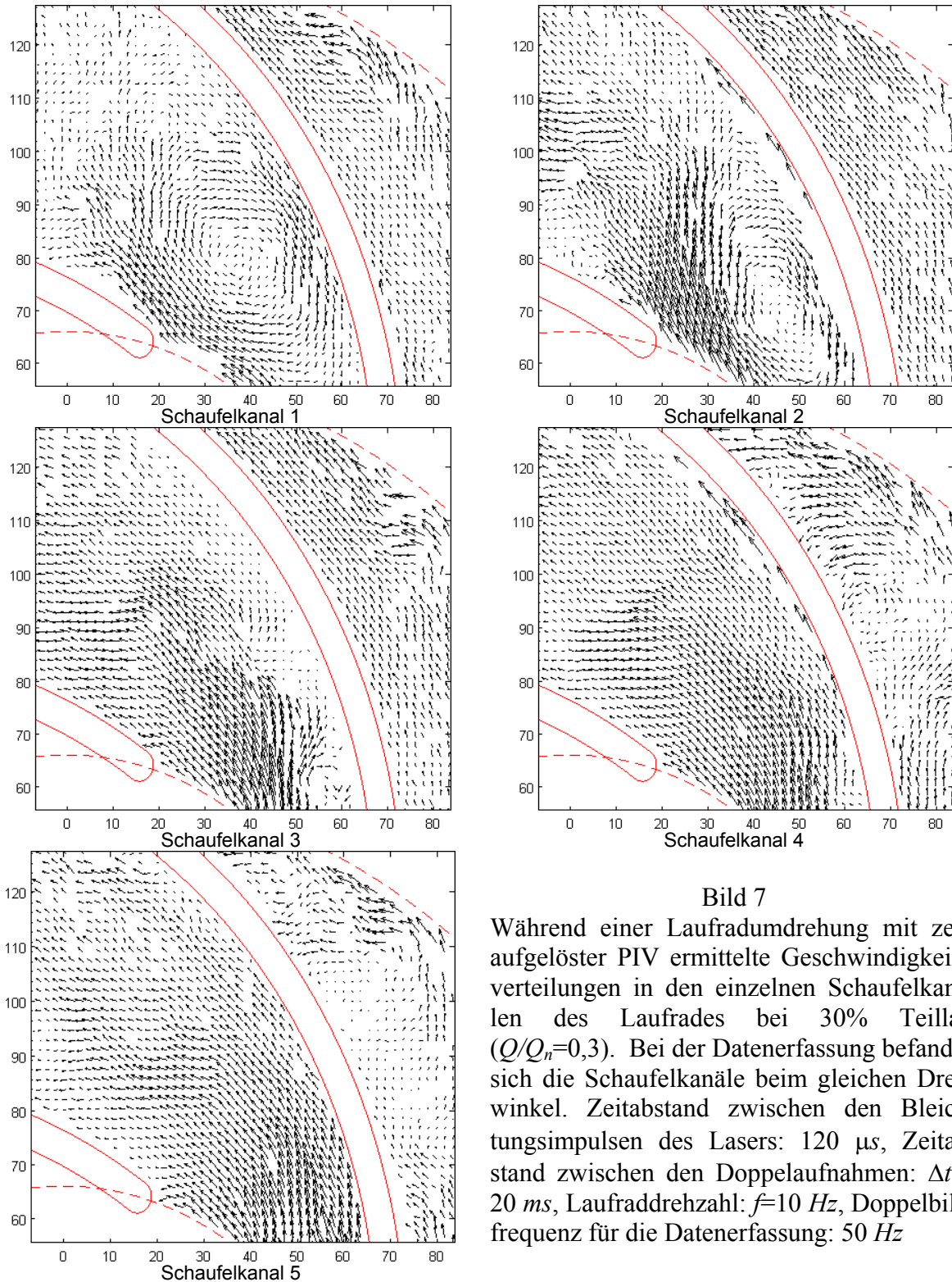


Bild 7

Während einer Laufradumdrehung mit zeit aufgelöster PIV ermittelte Geschwindigkeitsverteilungen in den einzelnen Schaufelkanälen des Laufrades bei 30% Teillast ($Q/Q_n=0,3$). Bei der Datenerfassung befanden sich die Schaufelkanäle beim gleichen Drehwinkel. Zeitabstand zwischen den Bleichungsimpulsen des Lasers: $120 \mu s$, Zeitabstand zwischen den Doppelaufnahmen: $\Delta t = 20 ms$, Laufraddrehzahl: $f=10 Hz$, Doppelbildfrequenz für die Datenerfassung: $50 Hz$

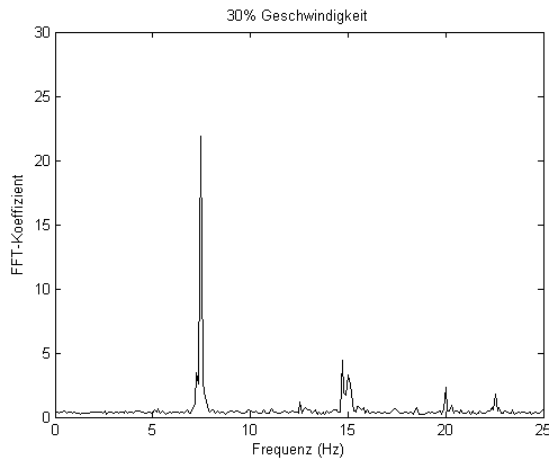


Bild 8 Amplitudenspektrum der Größe der Geschwindigkeitsvektoren bei einer Teillast von 30%

merkbar, die im Kanal 3 viel stärker in Erscheinung tritt. Am Eintritt in den Kanal 2 ist ein stark ausgebildeter Wirbel vorhanden. Der Eintritt in den Kanal 5 ist weitgehend blockiert.

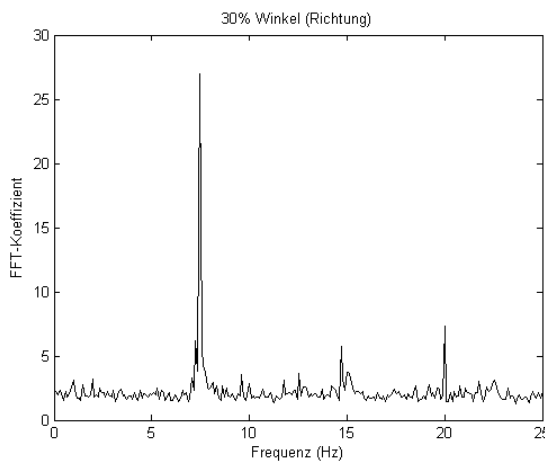


Bild 9 Amplitudenspektrum der Richtung der Geschwindigkeitsvektoren bei einer Teillast von 30%

wurden die entsprechenden Spektren für das gesamte untersuchte Geschwindigkeitsfeld ermittelt. Im **Bild 8** ist das Amplitudenspektrum der Größe und im **Bild 9** das Amplitudenspektrum der Richtung der Geschwindigkeitsvektoren im untersuchten Strömungsfeld des Laufrades bei einer Teillast von 30% dargestellt. Eine Grundfrequenz von 7,5 Hz der rotierenden Abreißströmung ist in beiden Spektren deutlich erkennbar.

5. Zusammenfassung

Die zeitaufgelöste PIV stellt ein effektives Werkzeug zur quantitativen Untersuchung der zeitlichen Änderungen der Geschwindigkeit in instabilen, transienten Strömungsfeldern. Mit dieser berührungsfreien, laser-optischen Strömungsfeldmeßverfahren konnten nach unserem Wissen erstmalig die zeitlich veränderlichen, instabilen Geschwindigkeitsfelder im rotierenden Laufrad einer Radialpumpe bei starker Teillast quantitativ untersucht werden. Bei den dargelegten Untersuchungen wurden 50 Doppelbilder je Sekunde mit einer Videokamera zur

Im **Bild 7** sind die während einer Laufradumdrehung mit zeitaufgelöster PIV ermittelten Geschwindigkeitsvektorfelder bei einer Teillast von 30% in den einzelnen Schaufelkanälen dargestellt. Die Doppelbildfrequenz für die Datenerfassung betrug 50 Hz. Die Unterschiede zwischen den einzelnen Geschwindigkeitsfeldern sind deutlich erkennbar. Die Herausbildung der rotierenden Abreißströmung ist ausgehend vom Schaufelkanal 5 gut zu verfolgen. Beim Kanal 5 ist eine verhältnismäßig geordnete Zuströmung zu verzeichnen. Im Kanal 4 macht sich an der Saugseite der vorderen Schaufel eine Ablösung der Grenzschicht bemerkbar. Am Eintritt in den Kanal 2 ist ein stark ausgebildeter Wirbel vorhanden. Der Eintritt in den Kanal 5 ist weitgehend blockiert. Die im Bild 7 dargestellten Geschwindigkeitsvektorfelder wurden aus einer Meßreihe entnommen. In einer mit 50 Hz Doppelbildfrequenz aufgenommenen Meßreihe wurden während 102 Laufradumdrehungen 510 Doppelbilder erfaßt. Solche Meßreihen wurden in unterschiedlichen Betriebspunkten der Versuchspumpe aufgenommen. Die zeitliche Änderungen der Größe und der Richtung der Vektoren in den einzelnen Raumpunkten des erfaßten Geschwindigkeitsfeldes wurden mit der Fast-Fourier-Transformation analysiert. Durch Summieren der so in diskreten Punkten erhaltenen Spektren

Ermittlung der Geschwindigkeitsvektoren im untersuchten Strömungsfeld aufgenommen. Die von uns bereits durchgeführten Untersuchungen der rotierenden Abreißströmung am gleichen Versuchsgerät mit einer Datenerfassungsfrequenz von 500 Hz lassen weitere Details der zeitlichen Änderung der Wirbelstruktur erkennen.

Die Autoren danken der Dantec Dynamics GmbH für die Bereitstellung der für die Durchführung der Untersuchungen notwendigen PIV – Gerätetechnik.

Literatur

- [1] Emmons H. W., Pearson C. E., Grant H. P.: Compressor Surge and Stall Propagation, Transactions of the ASME, May 1955, pp 45-467
- [2] Gravdahl J. T.: Modeling and Control of Surge and Rotating Stall in Compressors Dr.ing. thesis, Report 98-6-W, Department of Engineering Cybernetics, Norwegian University of Science and Technology, N-7034 Trondheim, Norway, 1998
- [3] Ulbricht I.: Stabilität des stehenden Ringgitters, Dissertation, Fakultät V, TU Berlin, Berlin, 2002
- [4] Oldenburg, M.; Pap, E.: Velocity Measurement in the Impeller and in the Volute of a Centrifugal Pump by Particle Image Displacement Velocimetry, Vortrag zum Eighth International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics. 8-11 July, 1996, Lisbon, Portugal; Preprint Volume I, p. 8.2.1 - 8.2.5.
- [5] Pap, E.; Poppitz, H. P.; Czibere, T.; Kalmár, L.: Anwendung der Particle Image Displacement Velocimetry als Lichtschnittomographie zur Untersuchung von räumlichen Strömungsgeschwindigkeitsfeldern in einer Radialpumpe, MicroCAD'97, International Computer Science Conference. Universität Miskolc, Ungarn, 26.-27. Februar 1997, Tagungsband - Sektion L, S.101-108
- [6] Poppitz, H.P.: Anwendung der Particle Image Displacement Velocimetry zur Geschwindigkeitsmessung im rotierenden Pumpenlaufrad und Vergleich mit einem numerischen Verfahren, Dissertation, Fakultät für Verfahrens- und Systemtechnik der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Magdeburg, 2001
- [7] Pedersen, N.: Experimental Investigation of Flow Structures in a Centrifugal Pump Impeller using Particle Image Velocimetry, Dissertation ET-PHD 2000-05, Fluid Mechanics, Department of Energy Engineering, Technical University of Denmark, November 2000
- [8] Nobutaka Hayashi, Masaharu Koyama, Ichiro Ariga: Study of Flow Patterns in Vaneless Diffusers of Centrifugal Compressors using PIV, Chiba Institute of Technology, Mechanical Engineering Department, 2-17-1 Tsudanuma, Narashio-shi, Chiba, Japan 275-0016
- [9] Wernet, M. P., 2000, "Application of DPIV to study both steady state and transient turbomachinery flows," Optics and Laser Technology, Vol. 32 No. 7-8, pp. 497-525.