

UNTERSUCHUNG DER PERIODISCH INSTATIONÄREN STRÖMUNG IN EINER EINSCHAUFELRADPUMPE

F.-K. Benra, H. J. Dohmen, M. Sommer
Universität Duisburg-Essen,
Fakultät für Ingenieurwissenschaften
Institut für Energie- und Umweltverfahrenstechnik
Strömungsmaschinen
Lotharstr. 1, 47057 Duisburg

Kurzfassung

Durch die Anwendung einer kommerziellen CFD-Methode in einer Einschaufelradpumpe wurde mit Hilfe eines numerischen Modells die transiente Strömung als Lösung der zeitabhängigen reynolds-gemittelten Navier-Stokes Gleichungen (URANS) bestimmt. Für alle Strömungsparameter wurde eine starke Abhängigkeit von der Laufradstellung im Gehäuse festgestellt. Insbesondere bei vom Auslegungspunkt abweichenden Betriebsbedingungen ergaben sich bei verschiedenen Laufradstellungen Strömungsfelder, die starke Ablösungen und Rückströmungen zeigten.

Um diese Ergebnisse zu validieren, wurde die periodische Strömung in der Pumpe experimentell untersucht. In einer komplett aus transparentem Kunststoff gefertigten Tauchpumpe wurden die Strömungsgeschwindigkeiten mit der Particle Image Velocimetry an drei Achsnormalschnitten ermittelt. Um die Periodizität der Strömung zu zeigen, wurden die Messungen für acht verschiedene Laufradpositionen durchgeführt. Für jede Laufradstellung wurde das Strömungsfeld aus zwanzig Einzelmessungen gemittelt. Der qualitative Vergleich der gemessenen Geschwindigkeitsfelder mit den numerischen Ergebnissen zeigt eine sehr gute Übereinstimmung in allen untersuchten Betriebspunkten. Quantitativ betrachtet sind die berechneten Geschwindigkeiten bis zu 20% höher als die gemessenen Geschwindigkeiten.

Einleitung

In den meisten Fällen werden für den Transport von Abwasser einstufige Pumpen verwendet. Die Zusammensetzung von Abwasser mit zum Teil erheblichen Anteilen an Fasern und Feststoffen setzt eine spezielle Laufradgeometrie voraus, um Betriebsstörungen durch Verstopfungen zu vermeiden. Aus diesem Grund werden sehr häufig Laufräder mit nur einer Schaufel eingesetzt. Nur mit solch einer speziellen Laufradgeometrie können freie Strömungsquerschnitte im Laufrad von mindestens $100 \times 100 \text{ mm}^2$ erreicht werden. Wenn dies der Fall ist, können im Wasser transportierte Feststoffe bis zu dieser Größe von der Pumpe gefördert werden, ohne die Pumpe zu verstopfen. Als Beispiel ist in Bild 1 eine Schnittdarstellung einer einstufigen Abwasserpumpe mit Einschaufelrad für Trockenaufstellung gezeigt.

Die für einen erfolgreichen Pumpenbetrieb erforderliche Zahl von mindestens einer Laufradschaufel bringt jedoch erhebliche Nachteile für den Pumpenbetrieb. Die Strömung durch das Laufrad erzeugt unterschiedliche Druckfelder an beiden Schaufeloberflächen. Diese Ausbildung einer so genannten Druckseite und einer Saugseite der Schaufel führt zu einer asymmetrischen Druckverteilung am äußeren Umfang des Laufrades, die mit dem Laufrad rotiert. Die aus dem Laufrad austretende Strömung steht in Wechselwirkung mit dem Pumpenge-

häuse, das ebenfalls eine asymmetrische Geometrie hat. Als Ergebnis bildet sich ein mit der Drehfrequenz des Laufrades periodisch instationäres Druckfeld aus, durch das auch periodisch veränderliche Strömungsgeschwindigkeiten induziert werden.



**Bild 1: Einstufige Abwasserpumpe mit Einschau-
felrad für Trockenaufstellung**

In dem hier vorliegenden Beitrag werden die absoluten Strömungsgeschwindigkeiten in einer transparenten Tauchpumpe mit der PIV-Methode auf experimentellem Wege in verschiedenen Betriebspunkten der Pumpe erfasst und mit Ergebnissen verglichen, die aus numerischen Lösungen der zeitabhängigen reynoldsgemittelten Navier-Stokes Gleichungen stammen.

Pumpenprüfstand und PIV-System

Der für die Experimente eingesetzte Prüfstand wurde ursprünglich an der Technischen Universität Berlin unter der Leitung von Herrn Prof. Helmut Siekmann aufgebaut und für die optische Messung von Strömungsgeschwindigkeiten in Tauchpumpen genutzt [1-3]. Der Prüfstand besteht aus einem Wasserbecken, das ca. 3 m³ Wasser fasst und an der Universität Duis-

burg-Essen generalüberholt und mit neuen Plexiglasfenstern als optischen Zugängen versehen worden ist. In dieses Becken ist eine Halterung für eine Tauchpumpe eingebaut. Die Pumpe besteht komplett aus Plexiglas und ist für die in der Tabelle 1 angegebenen Daten ausgelegt. Sie wird über eine in einem Rohr gelagerte Welle über ein Kardangelenk und einen Zahnriemen von einem Drehstrom-Asynchronmotor, der außerhalb des Tanks montiert ist, angetrieben. Der Prüfstand ist in Bild 2 schematisch dargestellt.

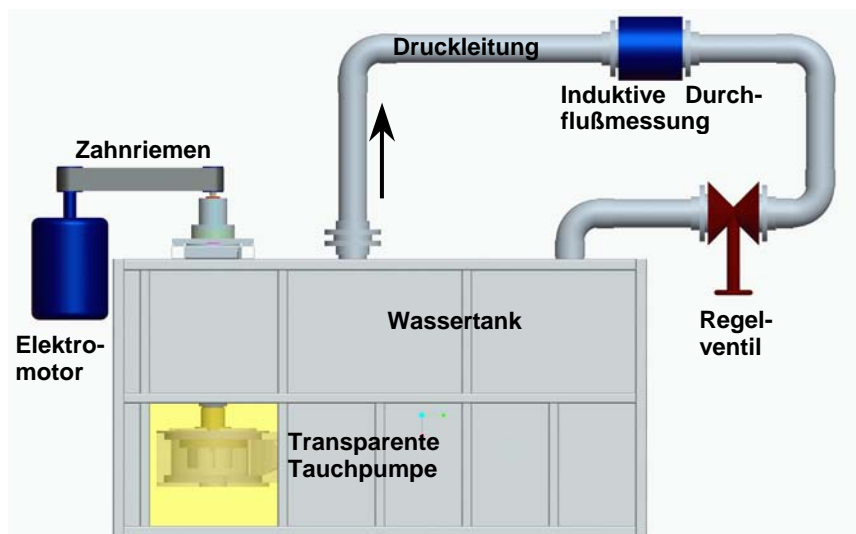


Bild 2: Schematische Darstellung des Prüfstandes für Tauchpumpen

In Bild 3 ist die Anordnung des PIV-Systems ebenfalls in schematischer Form zu sehen. Vom Pumpensystem sind nur das Gehäuse und die Antriebswelle dargestellt. Am Ende der Welle ist eine Markierung angebracht, über die mittels eines induktiven Sensors die Pumpendrehzahl und die Ausgangsposition der Laufradstellung registriert werden. Die Kamera des PIV-Messsystems ist auf einer 2D-Traversierung un-

| Auslegungsdaten | Wert | Durchmesser | Wert |
|-----------------|------------------------|-----------------------|--------|
| Q | 145 m ³ /h | D _{Ringraum} | 380 mm |
| H | 8 m | D ₂ | 240 mm |
| n | 1450 min ⁻¹ | D _S | 100 mm |
| n _q | 51 min ⁻¹ | | |

Tabelle 1: Auslegungsdaten der untersuchten Pumpe

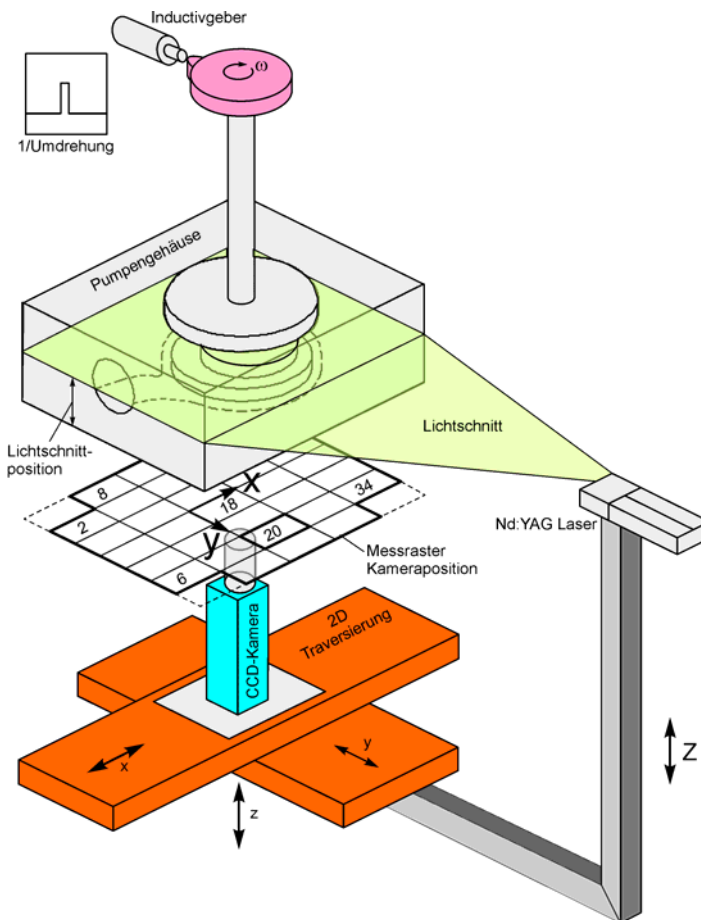


Bild 3: Aufbau des PIV-Messsystems

beschriebenen induktiven Impuls festgelegt. Ausgehend davon wurde über eine berechnete Zeitspanne auf eine bestimmte Laufradposition getriggert. Die Aufnahmen wurden mit einer Dantec Hi Sense CCD Kamera mit einer Pixelzahl von 1024x1280 Pixeln und einer Grauwertaufösung von 8 bit durchgeführt. Als Lichtquelle stand ein 20 Hz Dual Nd-Yag-Laser mit einer maximalen Pulsenergie von 120 mJ pro Einzelimpuls zur Verfügung. Der durch die verwendete Optik erzeugte divergente Lichtschnitt hatte eine Dicke von ca. 4 mm. Aufgrund der Durchdringung von Materialien mit unterschiedlichen optischen Eigenschaften und der damit verbundenen mehrfachen Änderung des Brechungsindex konnte kein Lichtschnitt mit vollständig homogener Dicke erzeugt werden.

In Bild 5 ist ein aufgenommenes Bild der Teilansicht Nr. 20 dargestellt. Die homogene Verteilung der dem Wasser beigefügten Polyamidpartikel als Seeding Material ist deutlich zu er-

terhalb des Wasserbeckens positioniert. Die Traversierung selbst ist auf einem höhenverstellbaren Tisch montiert, an dem auch die Lichtschnittoptik für die Aufweitung des Laserstrahls befestigt ist. Diese Anordnung garantiert eine feste geometrische Zuordnung zwischen dem Lichtschnitt und der Sichte ebene der Kamera auch bei Untersuchung unterschiedlicher axialer Schnittebenen.

In der ausgewählten Kameraposition ist das Sichtfeld der Kamera mit der verwendeten Optik 57x72 mm². Da diese Fläche sehr viel kleiner ist als die zu untersuchende Fläche der Pumpe, wurde wie in Bild 4 zu sehen, das Gesamtbild in 35 Einzelbilder aufgeteilt. Für die Messungen wurde die Kamera mit der 2D-Traversierung horizontal (x-, y-Ebene) jeweils um den entsprechenden Betrag verfahren und die Einzelbilder in der dargestellten Reihenfolge aufgenommen. Dabei wurde kein Überlappungsbereich der Einzelbilder vorgesehen. Da die verwendete Software des Dantec PIV-Systems [4] eine Steuerung der Traversierung erlaubte, konnte die Datenaufnahme automatisiert werden. Mit der hier beschriebenen Vorgehensweise wurde eine enorm hohe Auflösung für das Gesamtbild erreicht. Für jedes Teilbild wurden 20 Aufnahmen bei der selben Laufradstellung durchgeführt, um eine statistische Mittelung durchführen zu können. Die Ausgangsstellung des Laufrades ($\varphi = 0^\circ$ in Bild 4) wurde dabei durch den bereits

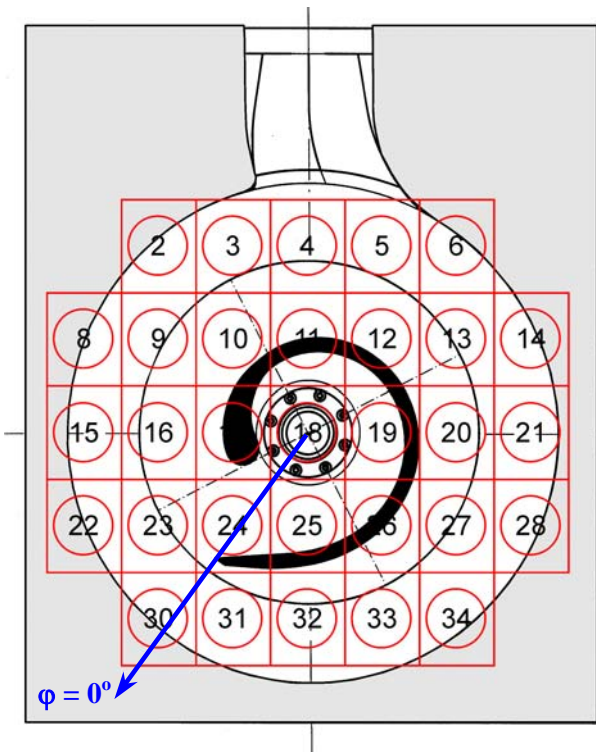


Bild 4: Aufteilung des Strömungsfeldes

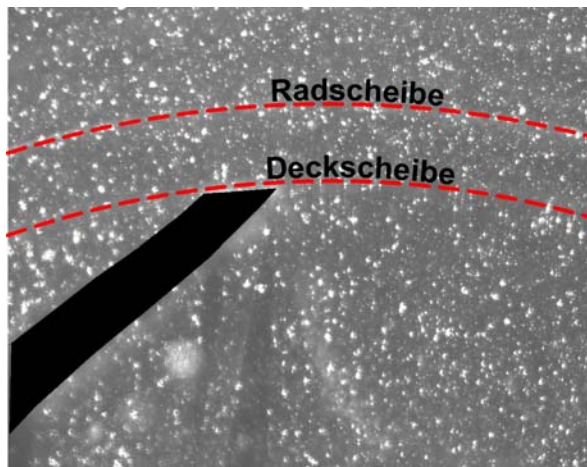


Bild 5: Bild der Teilsicht Nr. 20

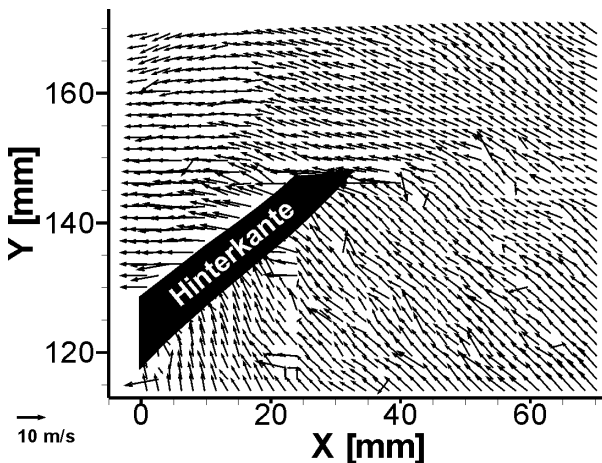


Bild 6a: Gemessene Rohvektoren (Nr. 20)

kennen. Die Partikel sind weiß und haben einen mittleren Durchmesser von $50 \mu\text{m}$. Die Dichte des Materials Polyamid ist $\rho = 1,016 \text{ kg/dm}^3$. Damit ist die Partikeldichte nur geringfügig größer als die Dichte des Wassers, was ein gutes Folgevermögen der Partikel in der Strömung und nur ein geringes Absetzen von Partikeln erwarten lässt. Die Hinterkante der Laufradschaufel wurde nachträglich schwarz maskiert. Die Außendurchmesser von Rad- und Deckscheibe wurden durch gestrichelte rote Linien besser sichtbar gemacht. Unterhalb der Schaufelhinterkante sind einige Schlieren im Bild zu erkennen, die durch Abschattung oder durch Reflexion des Laserlichtes entstanden sind. Die vorhandenen optischen Einschränkungen sind in diesem komplexen, dynamisch veränderlichen Messaufbau unumgänglich, aber lokal begrenzt und daher für die globale Qualität der Ergebnisse nicht entscheidend.

In Bild 6a sind die gemessenen Rohvektoren für das selbe Teilbild (Nr. 20) dargestellt. Insgesamt ist durch das verwendete Korrelationsverfahren ein Feld von 63×79 Vektoren entstanden. Die Größenordnung der Geschwindigkeiten ist durch einen Referenzvektor ($v_{\text{Ref}} = 10 \text{ m/s}$) im Bild angegeben. Das Geschwindigkeitsfeld enthält insbesondere an den zuvor beschriebenen Stellen einige in der Richtung und in der Größe von den in der Umgebung befindlichen Geschwindigkeiten stark abweichende Vektoren. Dieses Verhalten ist in einem in Teilbereichen herabgesetzten Signal-Rausch-Verhältnis und damit einhergehender erhöhter Korrelationsunsicherheit bzw. Korrelationsfehlern begründet. Aus diesem

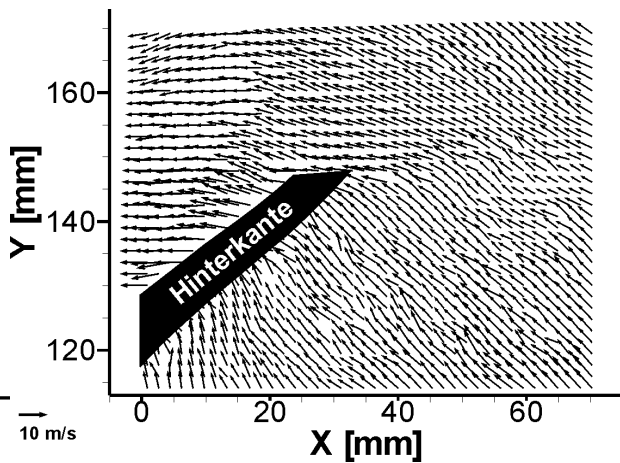


Bild 6b: Geglättetes Strömungsfeld (Nr. 20)

Grunde wurde das Geschwindigkeitsfeld durch ein 3x3 Moving Average Verfahren korrigiert. Dadurch ergab sich an den angesprochenen Stellen ein wesentlich gleichmäßigeres Geschwindigkeitsfeld, wie in Bild 6b zu erkennen ist. Danach wurde ein statistisches Verfahren (Mittelung) auf die so vorbereiteten 20 Einzelaufnahmen pro Laufradposition angewendet. Da die Strömung periodisch mit der Drehfrequenz des Laufrades war, blieb dabei das globale Strömungsbild erhalten, die Signalqualität wurde jedoch wesentlich verbessert.

Um eine Gesamtdarstellung des Vektorfeldes zu erhalten, wurden die so behandelten Teilvektorfelder Nr. 2 bis Nr. 34 bei der selben Schaufelstellung zu einem einzigen Vektorfeld mit der Software Matlab [5] zusammengefügt. Die Software Tecplot [6] diente im Anschluss daran zur Visualisierung des Gesamtvektorfeldes. Die Daten aller Teilbilder wurden sukzessive eingelesen und für Bild 7 zu einem Gesamtbild kombiniert. Da die Auflösung des Strömungsfeldes mit 31x63x79 Vektoren sehr hoch war, wurde nur jeder sechzehnte Geschwindigkeitsvektor dargestellt. Das Bild zeigt das komplette Strömungsfeld der Pumpe in einem Achsnormalschnitt bei halber Schaufelhöhe für die Laufradstellung $\varphi = 123^\circ$ im Betriebspunkt besten

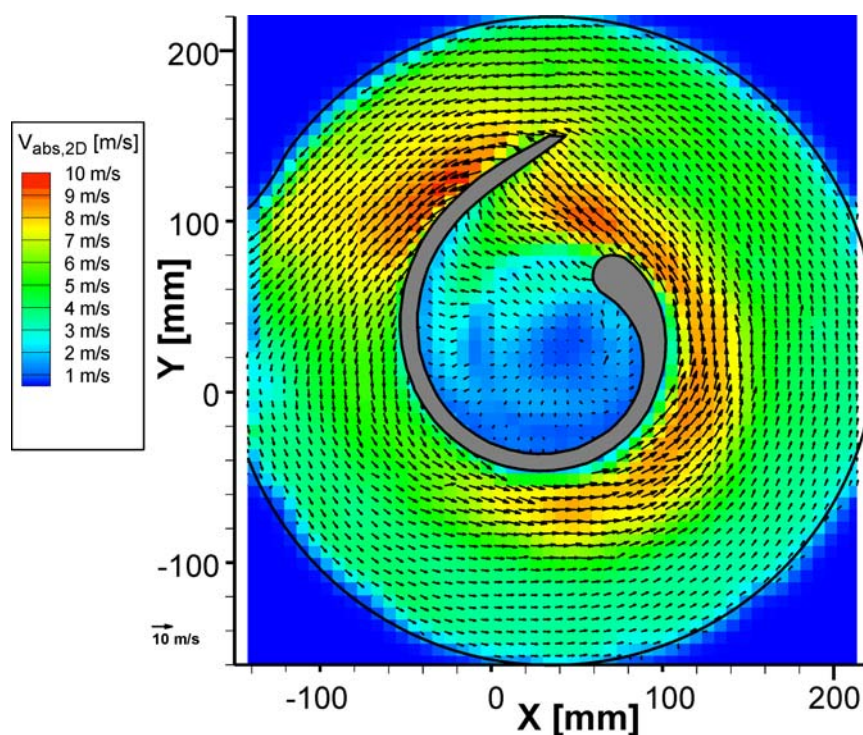


Bild 7: Gesamtes Strömungsfeld im Auslegungspunkt

Wirkungsgrades (Q_{Ausl}). Die Skalierung des Vektorfeldes ist wiederum durch einen Referenzvektor im Bild gegeben. Um die Eigenschaften des Strömungsfeldes besser sichtbar zu machen, wurde zusätzlich eine Farbskala für den Geschwindigkeitsbetrag verwendet. Blaue Farbe zeigt dabei Bereiche mit sehr kleinen Geschwindigkeiten an, während die Gebiete mit den höchsten Geschwindigkeiten (hier 10 m/s) durch rote Farbe gekennzeichnet sind. Die wahrscheinliche Genauigkeit der Messungen liegt bei etwa $\pm 5\%$.

Die Schaufel wurde durch eine Nachbearbeitung des Bildes mit grauer Farbe maskiert. Der Austrittsstutzen der Pumpe befindet sich auf der linken Seite des Bildes. In diesem Bereich wurden keine Vektoren erfasst, da das Gehäuse hier eine ausgeprägte dreidimensionale Geometrie hat, was zu starken optischen Verzerrungen führen würde. Entlang der Druckseite der Schaufel treten die größten Absolutgeschwindigkeiten auf. Im Bereich der Schaufelvorderkante bis ungefähr ein Drittel der Schaufellänge sind die Geschwindigkeiten sehr groß. Danach fallen sie auf Werte um etwa 4 m/s ab, um im letzten Viertel der Schaufellänge wieder auf Werte um 10 m/s anzusteigen. Kurz vor der Schaufelhinterkante werden die höchsten Geschwindigkeiten erreicht. Das Geschwindigkeitsfeld auf der Saugseite der Schaufel kann nur in der Nähe der Schaufelhinterkante ausgewertet werden, da der Saugmund der Pumpe durch den vorderen Bereich der Saugseite der Schaufel gebildet wird. Im Saugmund des Laufrades sind die Geschwindigkeiten in der x- und in der y-Richtung sehr klein. Hier existieren nur Vektoren in z-Richtung, die jedoch durch den verwendeten Messaufbau nicht sichtbar gemacht werden konnten. Zudem ist der Lichtschnitt wegen des Durchtrittes durch mehrere Plexiglaswände in diesem Bereich bereits abgeschwächt.

Vergleich von numerischen und experimentellen Ergebnissen

Der im folgenden durchgeführte Vergleich zwischen den berechneten und den gemessenen Werten wird für die Validierung der numerischen Simulation benutzt. Auf diese Weise kann die Qualität der numerischen Simulation überprüft werden. Das Ziel hier ist zu zeigen, dass durch die Simulation verlässliche Ergebnisse für die zeitabhängige Strömung in Einschaufelradpumpen erzielt werden können. Wenn dies nachgewiesen wird, kann auf eine große Anzahl von Experimenten verzichtet werden, da durch die Simulation alle Strömungsgrößen wie z. B. alle Geschwindigkeitskomponenten und der Druck bekannt sind. Nähere Informationen über die numerische Simulation der Strömung in der Pumpe sind in [7] verfügbar.

Die in diesem Kapitel dargestellten Ergebnisse zeigen Kurven konstanter Absolutgeschwindigkeiten im Achsnormalschnitt bei halber Schaufelhöhe in verschiedenen Betriebspunkten der Pumpe. Die Messungen wurden für diverse Laufradstellungen getriggert und die numerischen Ergebnisse für die gleichen Laufradstellungen aufbereitet. Im Auslegungspunkt der Pumpe wurden zusätzlich zu den Messungen bei halber Schaufelhöhe Messungen in Radscheibennähe und in Deckscheibennähe durchgeführt. Um eine qualitativ gut erkennbare Darstellung der Ergebnisse zu ermöglichen, wurde das Geschwindigkeitsfeld in der Messebene zusätzlich zu den Linien konstanter Geschwindigkeit farblich gekennzeichnet. Die Farbskalierungen der Messung und der Simulation sind teilweise geringfügig verschieden, da unterschiedliche Softwarepakete verwendet wurden. Es wurde jedoch darauf geachtet, dass die Farben für die minimal auftretende Geschwindigkeit $v_{\min} = 0$ m/s und die maximal auftretende Geschwindigkeit $v_{\max} = 12$ m/s für Messung und Rechnung jeweils gleich sind. Damit ist trotz unterschiedlicher Farbskalen ein Vergleich möglich.

Im Bild 8 wurde exemplarisch ein Ergebnis bei der Auslegungsdrehzahl für einen Teillastbetriebspunkt mit dem Ergebnis der numerischen Simulation verglichen. Die Laufradstellung ist für beide Ergebnisse $\varphi = 348^\circ$. Die Geschwindigkeitsfelder sind qualitativ sehr ähnlich und das Gebiet hoher Geschwindigkeiten entlang der Druckseite der Schaufel wird durch die Simulation mit Ausnahme der letzten 5% der Schaufellänge sehr gut wieder gegeben. Selbst entlang der letzten 10% der Schaufelaußenseite stimmen numerische und experimentelle Ergebnisse gut überein. Quantitativ betrachtet scheinen die berechneten Geschwindigkeiten im gesamten Strömungsfeld geringfügig größer zu sein als die gemessenen.

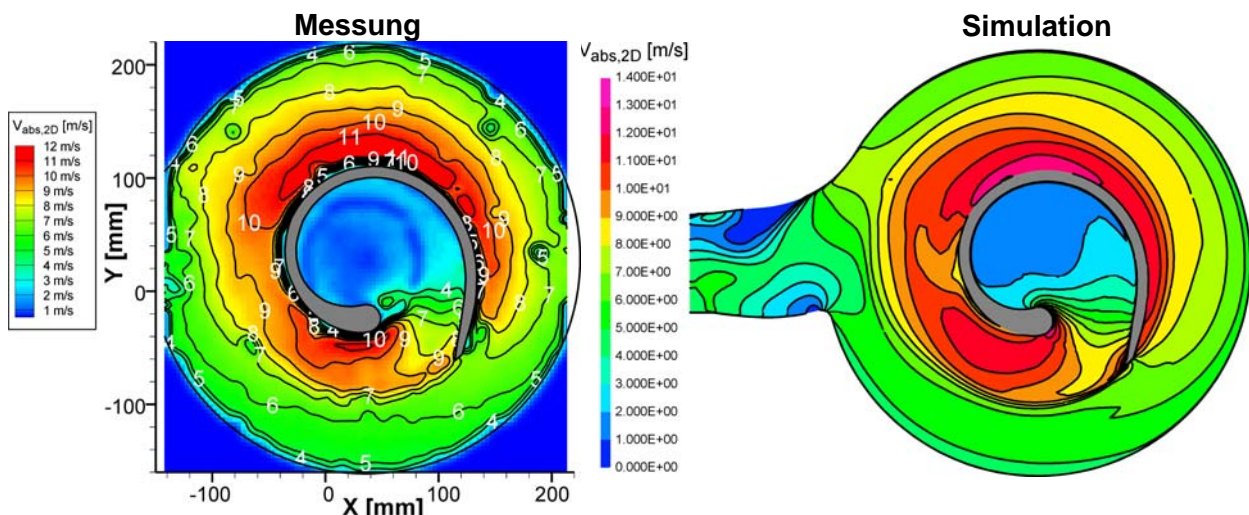


Bild 8: 2D-Geschwindigkeitsfeld im Teillastpunkt ($Q/Q_{\text{Ausl}}=50\%$, $n=1450$ min $^{-1}$, $\varphi=348^\circ$)

Im Bild 9 wurde das gemessene Geschwindigkeitsfeld in einem Überlastbetriebspunkt der Pumpe für den Laufraddrehwinkel $\varphi=258^\circ$ den numerischen Ergebnissen gegenübergestellt. Wie unter Annahme der Stromfadentheorie für stark rückwärts gekrümmte Schaufeln zu er-

warten, sind die Beträge der Absolutgeschwindigkeiten bei diesem Volumenstrom deutlich kleiner als beim Teillastvolumenstrom. Dieses Verhalten wird in den Messergebnissen und auch durch die Simulationen wieder gegeben. Dabei ist zu erkennen, dass die berechneten Geschwindigkeiten im gesamten Strömungsfeld höher sind als die gemessenen. Die maximalen berechneten Geschwindigkeiten liegen bei $v_{\max,S} \approx 10 \text{ m/s}$, während die maximalen gemessenen Geschwindigkeiten bei $v_{\max,M} \approx 8 \text{ m/s}$ liegen.

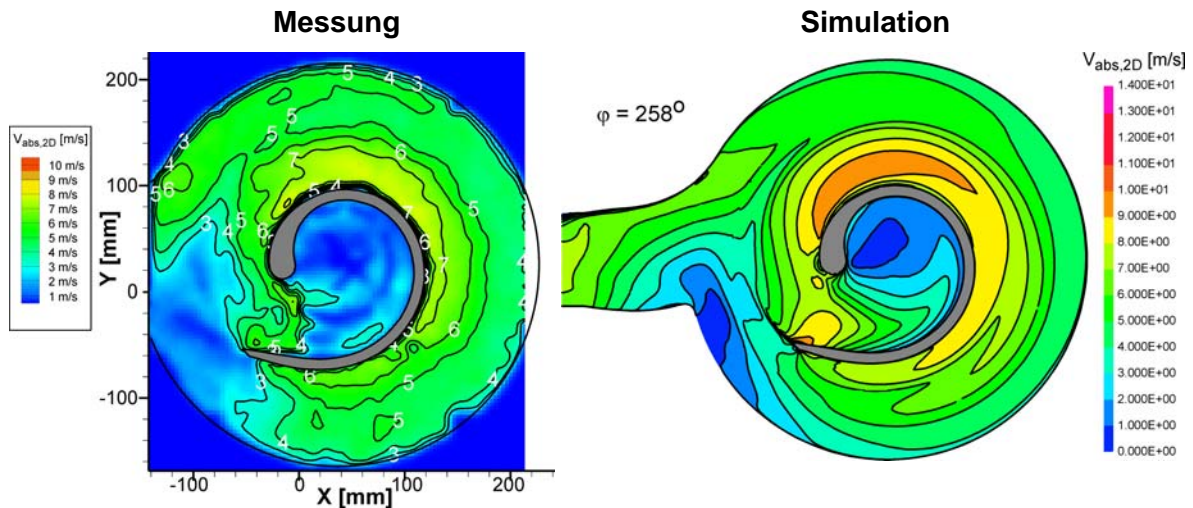


Bild 9: 2D-Geschwindigkeitsfeld im Überlastpunkt ($Q/Q_{\text{Ausl}}=125\%$, $n=1450 \text{ min}^{-1}$, $\varphi=348^\circ$)

In der gezeigten Laufradstellung konnte durch die Messung ein Gebiet mit sehr geringen Geschwindigkeiten (kleiner als 3 m/s) in der Nähe des Druckstutzens hinter der Schaufelhinterkante identifiziert werden. Auch die Simulationsergebnisse zeigen diesen Bereich geringere Geschwindigkeiten, allerdings ist er hier wegen der grundsätzlich höheren Geschwindigkeiten räumlich nicht so stark ausgedehnt. Die höchsten Geschwindigkeiten treten sowohl bei der Messung als auch bei der Simulation kurz hinter der Vorderkante an der Druckseite der Schaufel auf.

Um festzustellen, ob das Strömungsfeld auch eine Abhängigkeit von der axialen Koordinate aufweist, wurden neben der Messebene bei halber Schaufelhöhe weitere Messebenen in der Nähe der Radscheibe (25% Schaufelhöhe) und in der Nähe der Deckscheibe (75% Schaufelhöhe) untersucht. In Bild 10 sind die gemessenen und die berechneten Geschwindigkeitsfelder im Auslegungspunkt bei der Laufradstellung $\varphi = 213^\circ$ für diese drei Messebenen dargestellt. Auch hier ist die Übereinstimmung zwischen Messung und Rechnung wiederum qualitativ sehr gut. In der Nähe der Radscheibe sind die Geschwindigkeiten am geringsten, während in der Nähe der Deckscheibe die größten Absolutgeschwindigkeiten auftreten. Der Vergleich zeigt sowohl für die Messung als auch für die Simulation, dass die Geschwindigkeiten in der Nähe der Druckseite der Schaufel von der Radscheibe in Richtung Deckscheibe deutlich ansteigen. Die größeren Geschwindigkeiten in der Nähe der Deckscheibe lassen sich durch die Umlenkung der axialen Zuströmung zum Laufrad in die radiale Abströmrichtung erklären. Im Bereich der Deckscheibe ergeben sich aufgrund der plötzlichen Richtungsänderung deutlich größere Geschwindigkeiten als in Radscheibennähe.

In der Messebene in Radscheibennähe (25% Schaufelhöhe) treten die größten Geschwindigkeiten an der Druckseite der Schaufel etwa bei halber Schaufellänge auf. Bei halber Schaufelhöhe ist das Geschwindigkeitsmaximum geringfügig in Richtung Schaufelvorderkante gewandert. In der Nähe der Deckscheibe (75% Schaufelhöhe) erscheinen die Maximalwerte der Geschwindigkeiten sehr nahe an der Schaufelvorderkante. Das Maximum der Absolutgeschwindigkeiten wandert also deutlich in Richtung zur Schaufelvorderkante zwischen halber Schaufelhöhe und Deckscheibennähe.

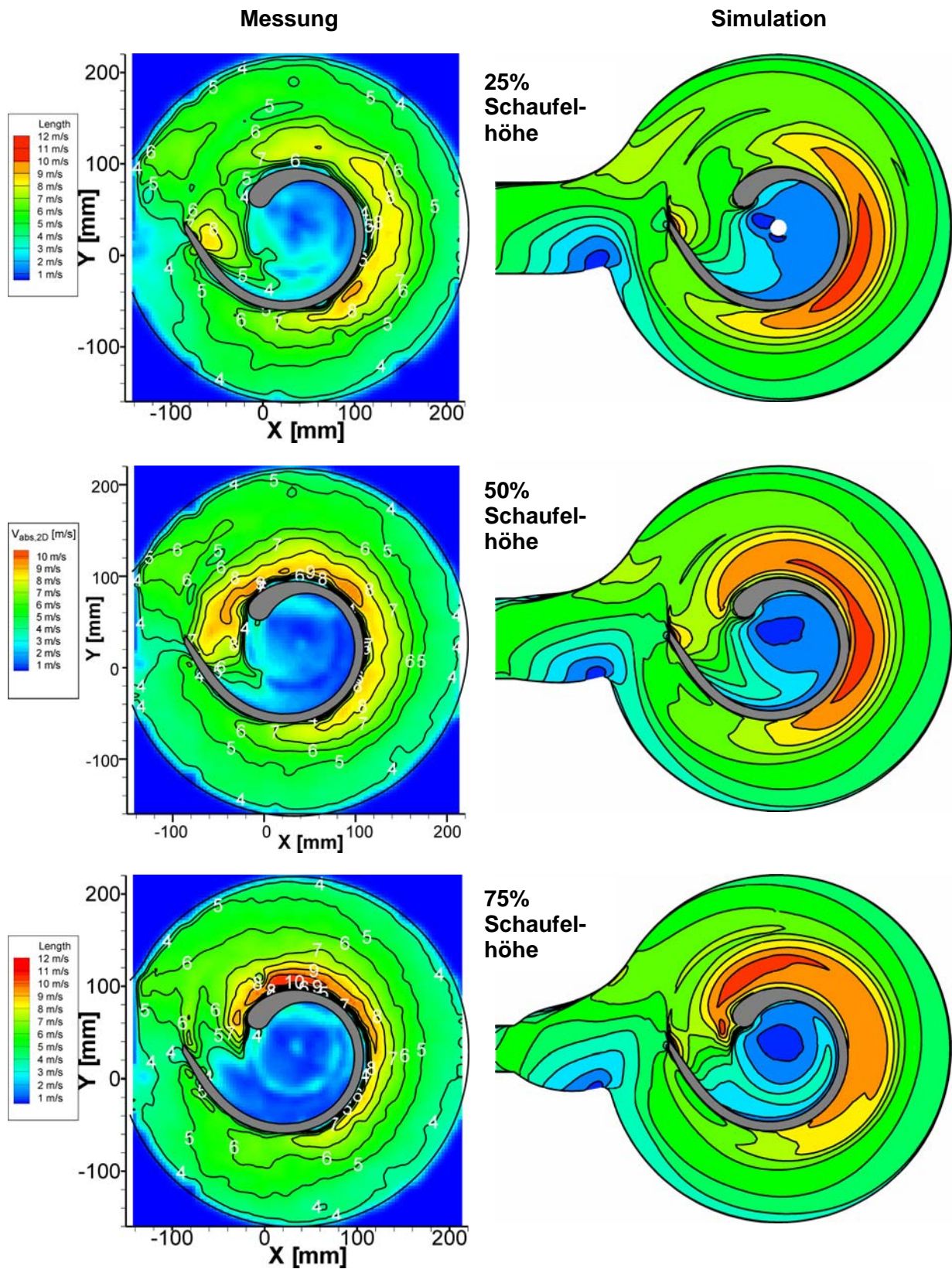


Bild 10: 2D-Geschwindigkeitsfeld im Auslegungspunkt für verschiedene Schaufelhöhen ($Q/Q_{Austl}=100\%$, $n=1450 \text{ min}^{-1}$, $\varphi=213^\circ$)

Zusammenfassende Bemerkungen

In diesem Beitrag wird die experimentelle Untersuchung der periodisch instationären Strömung in einer einstufigen Tauchpumpe mit Einschaufelrad beschrieben. Im allgemeinen kann festgestellt werden, dass die Ergebnisse transients numerischer Strömungssimulationen qualitativ sehr gut mit den hier mittels der PIV-Methode erzielten Ergebnissen übereinstimmen. In allen untersuchten Betriebspunkten und bei allen Laufradstellungen wird das grundlegende Strömungsverhalten durch den verwendeten CFD-Code TASCflow als auch durch die optische Messmethode erfasst. Der für die stark rückwärts gekrümmte Schaufel typische Abfall der Absolutgeschwindigkeiten mit steigenden Volumenstrom wird sowohl von der numerischen als auch von der experimentellen Methode gleichermaßen gut wieder gegeben. Auch die Änderungen des Geschwindigkeitsfeldes während der Laufraddrehung im Gehäuse werden von beiden Verfahren qualitativ gleich beschrieben.

Ein Vergleich der quantitativen Werte aus Simulation und Messung ergibt, dass die berechneten Geschwindigkeiten zwischen 10 und 20% höher sind, als die gemessenen. Dieses Verhalten ist für alle untersuchten Betriebspunkte, alle Achsnormalschnitte und alle Laufradstellungen erkennbar. Bisher konnte trotz sorgfältiger Überprüfung des Messaufbaus kein Grund für einen derartigen systematischen Messfehler gefunden werden. Auch die Überprüfung des numerischen Modells mit seinen Randbedingungen ergab keinen Fehler, der eine derartige Abweichung der Strömungsgeschwindigkeiten erwarten ließe. Um die beschriebene Diskrepanz zwischen den Messwerten und den numerischen Ergebnissen zu erklären, sind zur Validierung der PIV-Messungen weitere Geschwindigkeitsmessungen mit dem LDV-Verfahren sowie zusätzliche numerische Untersuchungen mit variierten Randbedingungen geplant.

Danksagung

Diese Untersuchung wird zum größten Teil von der *Stiftung Industrieforschung, Köln* finanziert. Auch die Firmen *Wilo AG, Dortmund*, *Ruhrpumpen GmbH, Witten*, *Herborner Pumpentechnik, Herborn* und *DIA Pumpen, Langenfeld* begleiten das Projekt durch eine finanzielle Unterstützung und durch eine aktive Beteiligung in einem wissenschaftlichen Arbeitskreis. Die Autoren bedanken sich bei allen Beteiligten für diese Förderung. Ein besonderer Dank wird von den Autoren an Herrn Professor Helmut Siekmann von der *Technischen Universität Berlin* für die Überlassung des Prüfstandes für die experimentellen Untersuchungen gerichtet. Dank gebührt auch der Firma Dantec Dynamics für die leihweise Überlassung des verwendeten Lasers.

Literatur

- [1] Ulbrich C.: Experimentelle Untersuchung der Pumpencharakteristiken und Geschwindigkeitsfelder einer Einschaufelrad-Kreiselpumpe, Dissertation TU Berlin, 1997
- [2] Scheffler, T.; Siekmann, H.: Multi Field DPIV Measurements in a Single Blade Pump, 7th International Conference on Laser Anemometry Advances and Applications, Karlsruhe 1997
- [3] Siekmann, H.; Scheffler, T.: Unsteady Flow Field Investigations by Means of Digital Particle Image Velocimetry, The Fifth Asian International Conference On Fluid Machinery, Seoul, Korea, 1997
- [4] Dantec Measurement Technology: FlowManager Software and Introduction to PIV Instrumentation, Dantec Measurement Technology, Skovlunde, Dänemark, 2000
- [5] The MathWorks Inc.: Learning MATLAB, Natick, Massachusetts, USA, 2004
- [6] Tecplot Inc.: Tecplot User's Manual, Version 10, Bellevue, Washington, USA, 2005
- [7] Benra, F.-K.; Sommer, M., Müller; M., Töws: A.: Investigation of the Three-Dimensional Time Accurate Flow in Single-Blade Sewage Water Pumps, Proceedings of the Fourth South African Conference of Applied Mechanics, SACAM'04, Johannesburg, South Africa, 2004