Fachtagung "Experimentelle Strömungsmechanik"

9.–11. September 2025, Darmstadt

Untersuchung der drallbehafteten Einlaufströmung einer Kreiselpumpe mittels Stereo-PIV (2D3C) zur Beurteilung strömungsinduzierter Anregungsmechanismen

Investigation of the swirling inlet flow of a centrifugal pump by means of Stereo-PIV (2D3C) to assess flow-induced excitation mechanisms

Marc Ladwig[1], Daniel P. Gradzki[1], Ralph Lindken[1]

[1]Institut für Thermo- und Fluiddynamik, Fachbereich Mechatronik und Maschinenbau,

Hochschule Bochum, Am Hochschulcampus 1, 44801 Bochum

Zustandsüberwachung, Kreiselpumpe, Druckpulsation, PIV, turbulente Rohrströmung
condition monitoring, centrifugal pump, pressure pulsation, PIV, turbulent pipe flow

Zusammenfassung

Radialpumpen stellen integrale Bauteile fluidtechnischer und insbesondere hydraulischer Systeme dar. Eine möglichst genaue und gleichzeitig simple Erfassung ihres jeweiligen Betriebszustands in Kombination mit einer aus den Zustandsdaten abgeleiteten Prognose über die verbleibende Lebensdauer der Maschine ist vielfach Gegenstand forcierter Optimierungen. Optimierungen können nicht nur in Bezug auf einen kostenminimierten Betrieb der Pumpe selbst betrachtet werden, sondern bieten komplementär die Möglichkeit einen verminderten Ressourceneinsatz über den Lebenszyklus der Pumpe hinweg zu realisieren. In einem vorherigen Beitrag (vgl. Ladwig et al. 2021) wurde dazu ein Versuchsstand für die Zustandsüberwachung (Condition Monitoring) von Kreiselpumpen errichtet. Anhand künstlich eingebrachter Pumpenschäden können die Änderung strömungsmechanischer und vibrometrischer Zustandsdaten vergleichend zum Normalbetrieb im unbeschädigten Zustand untersucht werden. Radialpumpen mit axialen Eintrittsstutzen besitzen, abhängig von ihrer konstruktiven Ausprägung im Detail, eine mehr oder weniger stark ausgeprägte Sensitivität der hydraulischen Betriebsdaten hinsichtlich der vorliegenden Zuströmbedingungen im Eintrittsstutzen. Gleichzeitig besteht umgekehrt eine Kopplung zwischen den saugseitigen Zuströmbedingungen und dem momentanen Betriebspunkt der Pumpe. Hinsichtlich der zuvor beschriebenen Zustandsüberwachungsstrategie ist es daher erstrebenswert strömungsinduzierte Anregungsmechanismen und deren Auswirkungen auf das mechanische Schwingungsverhalten der Pumpe zu erfassen und ggf. signaltechnisch zu isolieren. Es wird daher zunächst anhand laseroptischer Messungen der saugseitigen Pumpeneinlaufströmung mittels Stereo-PIV(3D2C), die Ausprägung der vorliegenden Strömungsform in der Saugleitung einer Normkreiselpumpe untersucht. Es werden hierbei Betriebspunkte im Teil- und Überlastbereich der Pumpe, bei korrespondierenden Reynolds Zahlen zwischen $Re = 6{,}5 \cdot 10^4$ und $1{,}5 \cdot 10^5$ angefahren.

Copyright © 2025 and published by German Association for Laser Anemometry
GALA e.V., Karlsruhe, Germany, ISBN 978-3-9827594-0-1

1 Einleitung

Aus experimentellen Untersuchungen der saugseitigen Einlaufströmung von Kreiselpumpen, vgl. Gülich 2013, Murakami 1996 und Fraser 1981, ist bekannt, dass in der Regel vorwiegend unter gedrosselten Betriebsbedingungen eine vom Pumpenlaufrad ausgehende Zirkulationsströmung in die saugseitigen Verrohrung der Pumpe durch Impulsaustausch induziert wird. Diese induzierte Zirkulationsströmung bewirkt eine stark dreidimensionale Geschwindigkeitsverteilung im Ansaugrohr selbst, welche bei zunehmender Verringerung des Förderstroms der Pumpe durch druckseitige Drosselung intensiviert wird (Gülich 2013).
Murakami et al. 1962 haben durch Kugelsonden-Messungen an einer schnellläufigen Pumpe mit Diagonalrad n_q = 100 gezeigt, dass ab einem relativen Förderstrom $q^* = Q/Q_N = 0{,}86$ bezogen auf den Nennförderstrom der Pumpe, Rückströmungen ausgehend vom Laufrad in die Saugleitung auftraten, welche mit zunehmender druckseitiger Verringerung des Förderstroms intensiviert wurden.
Breugelmans und Sen (Breugelmans und Sen 1982) haben weiter einen kritischen Förderstrom definiert ab dem Rückströmungen auftraten, welche in den dortigen Messungen bei relativen Förderströmen zwischen $q^* = 0{,}3 – 0{,}5$, also im Teillastbereich deutlich unterhalb des Nennbetriebspunkts der Pumpe lagen. Ein derartig definierter kritischer Volumenstrom kann somit als Schwellwert für den Beginn einer ausgeprägten saugseitigen Rückströmung interpretiert werden, welcher von Gülich im Bereich um $q^* = 0{,}6$ für eine Vielzahl von Messungen verortet wurde (vgl. Gülich 2013). Die Ausprägung der jeweiligen lokalen Strömungsbedingungen insbesondere im Hinblick auf die wandnahe Druckmessung im Ansaugrohr der Pumpe, und hier speziell der Messquerschnitt zwei Rohrdurchmesser vor dem Pumpenflansch, ist daher von besonderem Interesse und wird im Rahmen dieses Beitrags mittels einem stereoskopischen 2D3C-PIV Messaufbau näher untersucht.

Tabelle 1: Hydraulische Betriebsdaten der Messreihen bei Nenndrehzahl n* = 1.

Messreihe			N1	N2	N3	N4
Betriebspunkt $q^* = Q/Q_N$	q^*	[-]	0.5	0,75	1	1,15
Spezifische Betriebsdrehzahl	n^*	[-]	1	1	1	1
Spezifische Drehzahl der Pumpe	n_q			19,4		
Nomineller Volumenstrom	Q	[l/min]	153.0	228.5	304.5	350.2
$Re = (U_M \cdot D/\nu)$	Re	[-]	$6.5 \cdot 10^4$	$9.7 \cdot 10^4$	$1.3 \cdot 10^5$	$1.49 \cdot 10^5$
Mittlere Strömungsgeschwindigkeit	U_M	[m/s]	1.278	1.909	2.544	2.926

2 Experimenteller Versuchsaufbau

2.1 Hydraulischer Grundaufbau des Prüfstands und Betriebsdaten

Der im Rahmen dieses Beitrages genutzte hydraulische Prüfstand ist schematisch in Abb. 1 dargestellt. Bei der untersuchten Pumpe handelt es sich um eine einstufige Normpumpe (DIN EN 733, spezifische Drehzahl n_q = 19,4) mit axialem Eintritt und Lagerträger, welche über eine elastische Wellenkupplung von einem frequenzgeregelten Asynchronmotor angetrieben wird. Tabelle 1 zeigt die wichtigsten technischen Daten. Der Prüfaufbau der Pumpe entspricht dabei der in Prozessanlagen verbreiteten trocken aufgestellten horizontalen Bauweise. Die Pumpe fördert über den Druckstutzen in einen offenen Kreislauf mit Rohrnennweite DN 40 auf der Druckseite und DN 50 auf der Saugseite. Der Förderstrom wird druckseitig mittels magnetisch-induktivem Durchflusssensor (IFM, SM 9004) erfasst, weiter wird die momentane Drehzahl der Pumpe optisch über eine Reflexionslichtschranke mit Reflektor (Balluff, BOS01CE) an der Antriebskupplung gemessen. Abbildung 2 veranschaulicht hierzu den realisierten Laboraufbau.

Copyright © 2025 and published by German Association for Laser Anemometry
GALA e.V., Karlsruhe, Germany, ISBN 978-3-9827594-0-1

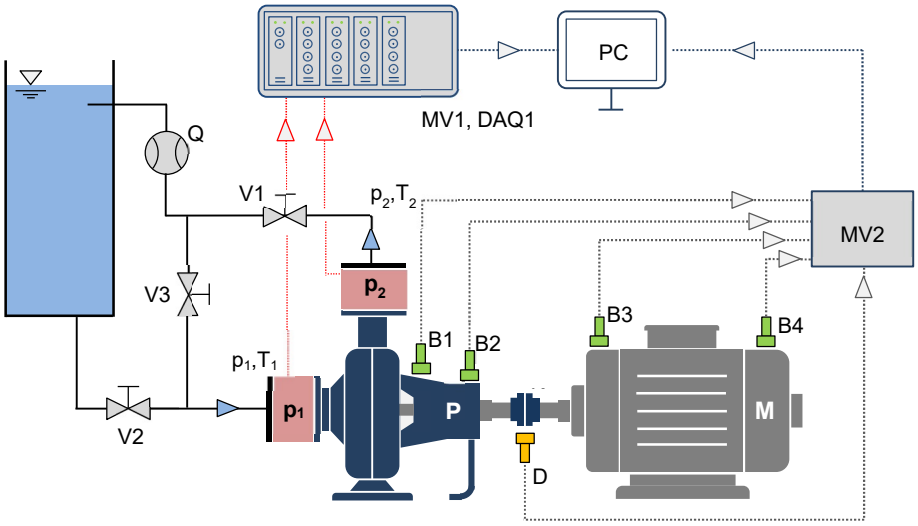

Abb. 1: Schematische Darstellung des hydraulischen Versuchsaufbaus: Kreiselpumpe (P), Antriebsmotor (M), Kupplung (K), Druckmessstellen (p_1) und (p_2), Drosselschieber (V1) - (V3), Durchflussmesser (Q), Schwingungsaufnehmer (B1) - (B4), optischer Drehzahlmesser (D) sowie Messverstärker und Datenerfassung (MV1/DAQ1, MV2/DAQ2), vgl. Ladwig et al. 2021.

Tabelle 2: Technische Daten der Kreiselpumpe und der Antriebsmaschine

Pumpe					Antriebsmotor	
Nenn-förderhöhe	Nenn-Förderstrom	Nenn-drehzahl	Laufrad-austritts-Ø	Schaufel-zahl	Nenn-leistung	Nenn-drehzahl
H_N [m]	Q_N [m³/h]	n_N [min^{-1}]	d_2 [mm]	z	P_N [kW]	n_N [min^{-1}]
23,5	18	2900	153	7	3	2900

2.2 Versuchsaufbau Stereo-PIV

Den experimentellen Versuchsaufbau für die Vermessung der turbulenten Einlaufströmung auf der Saugseite der Pumpe zeigt Abbildung 2. Für unsere Messungen lag die Messebene in einem axialen Abstand von 2 Rohr-Innendurchmessern (= 100 mm ± 0,1 mm) stromaufwärts des Saugstutzens der Pumpe (vgl. Abb. 2 + Abb. 3). Die axiale Position wurde gewählt, da hier üblicherweise die Druckabnahmestellen liegen. Das Messfeld (FOV) liegt radial senkrecht zur Rohrachse. Für den optischen Zugang wurde das Saugrohr durch ein transparentes Glasrohr (Schott, Duran) mit einem Innendurchmesser von 50,4 mm, einer Wandstärke von 1,8 mm sowie einem Brechungsindex von 1,473 (@ 587,6 nm) ersetzt. Die gerade Einlaufstrecke vor der Messebene beträgt x/D ≅ 20. Zur weiteren Reduzierung optischer Verzerrungen wurde das Rohr mit einem umgebenden wassergefüllten (identisch mit Testfluid) Bassin mit seitlich angeflanschten Wasserprismen (vgl. Prassad et al. 1995) zur Reduzierung brechungsbedingter optischer Verzerrungen versehen. Sowohl Wasserprismen als auch das umgebende Bassin besitzen 2 mm dicke Sichtfenster aus Floatglas.

Das stereoskopische PIV-Setup wurde als „angular displacement system“ (Prasad 2000, Willert 1997, Westerweel und van Oord 2000) mit einem Stereowinkel von 90° zwischen beiden Kameras aufgebaut. Zur Doppelbildaufnahme wurden zwei 16-bit CMOS-Kameras mit einer Sensorgröße von 2560 x 2160 Pixel und einer Pixelgröße von 6,5 µm (LaVision, Imager

Copyright © 2025 and published by German Association for Laser Anemometry
GALA e.V., Karlsruhe, Germany, ISBN 978-3-9827594-0-1

sCMOS) verwendet. Beide Kameras sind zusätzlich auf Scheimpflug-Adaptern montiert, um u.a. den benötigten Tiefenschärfenbereich zu minimieren. Der Scheimpflug-Winkel beider Kameras wurde entsprechend der Scheimpflug-Bedingung eingestellt (Prasad 2000, Westerweel und van Oord 2000, Willert 1997). Die Belichtung der PIV - Messebenen erfolgte durch einen Frequenz-verdoppelten Doppelpuls YAG-Laser (Quantel, Evergreen 200) mit einer maximalen Pulsenergie von 200 mJ bei einer Lichtwellenlänge von 523 nm. Im Rahmen unserer Messungen lag die eingestellte Pulsenergie bei etwa 50 mJ, die Lichtschnittdicke betrug im Messfeld ≅ 1,5 mm. Kameras und Laser wurden von einer Synchronisationseinheit (LaVision, PTU X) zeitlich getriggert und gemeinsam mit einer Frequenz von 5 Hz betrieben. Glashohlkügelchen (Spericel) mit einem mittleren Partikeldurchmesser von 10 µm wurden als Tracer genutzt, die mittlere Seeding-Dichte lag bei ca. 3,5 g pro Kubikmeter Testfluid, wobei im Messbetrieb etwa 450 l gefiltertes Leitungswasser im Temperaturbereich zwischen 19,1 und 23,7 °C genutzt wurden. Die Partikel-Stokes-Zahl lag für die genutzten Tracer bei St ≅ 0.01.

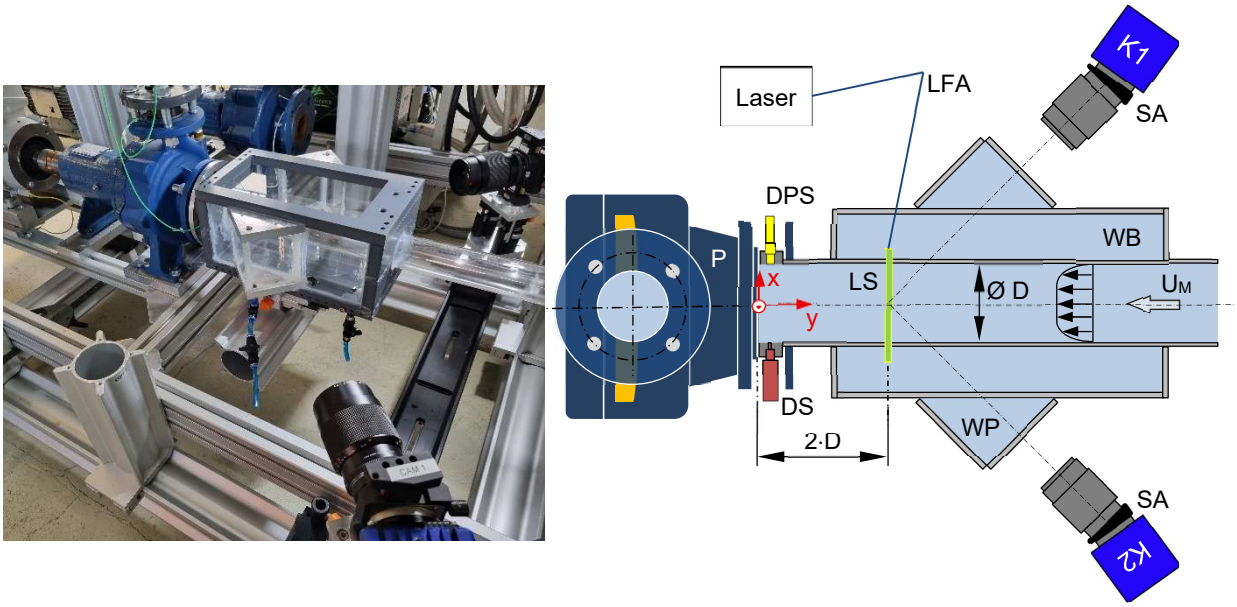

Abb. 2: Schematischer Aufbau zur Vermessung der saugseitigen turbulenten Einlaufströmung mittels stereoskopischer PIV. Pumpe (P), Kameras (K1, K2) montiert auf Scheimpflugadaptern (SA) gepaart mit Objektiven (O), das Umgebende Wasser-Bassin (WB) mit seitlichen Wasserprismen (WP), Lichtführungsarm (LFA), Lichtschnitt (LS), Drucksensor (DS), sowie dynamischen Piezo-Drucksensoren (DPS).

Insgesamt wurden für jeden Betriebspunkt jeweils Sequenzen bestehend aus 4.000 Doppelbildpaare aufgezeichnet. Der Laserstrahl wurde mittels Lichtführungsarm, gefolgt von einer Lichtschnittoptik mit divergenter Linse (f = -10 mm), geführt und aufgeweitet sowie vertikal von oben in die Messebene eingekoppelt. Eine geometrische Kalibrierung des PIV-Setups erfolgte mittels einer eigengefertigten kreisrunden 3D-Kalibrierplatte mit 48 mm Außendurchmesser aus schwarz eloxiertem Aluminium mit einem Ebenenabstand von 1,0 mm (vgl. Abb. 4a)). Die Kalibrierplatte wurde mittels Laserbeschriftung mit einem Punktmuster aus weißen Kreismarkern mit 1 mm Durchmesser und einem Markerabstand von 5 mm versehen und zur geometrischen Kalibrierung zentrisch im Messquerschnitt positioniert. Anschließend an die geometrische Kalibrierung wurde die „planar self-calibration“ (Wieneke 2005) auf Basis vorher in-situ erhobener experimenteller Daten (Partikelbilder) in DaVis 10 angewendet. Der resultierenden mittlere Fit-Error lag bei ≅ 0.2 Pixel. Für die Bildzuordnung wurde eine Polynomfunktion dritter Ordnung verwendet.

Copyright © 2025 and published by German Association for Laser Anemometry
GALA e.V., Karlsruhe, Germany, ISBN 978-3-9827594-0-1

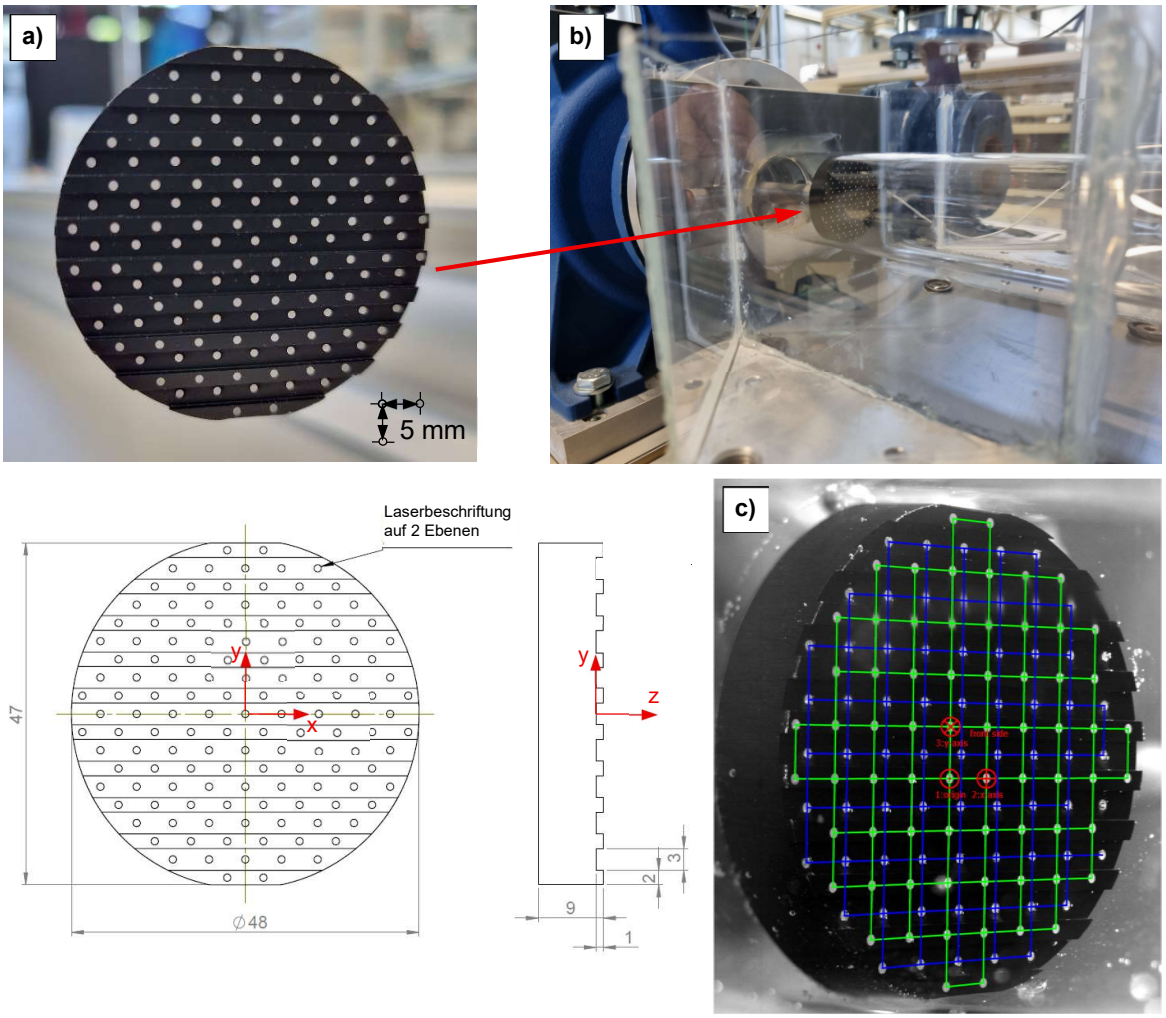

Abb. 3: a) Darstellung der 3D-Kalibrierplatte mit 5 mm Punktmarker-Gitter, b) Lage der Kalibrierplatte im eingebauten Zustand im Ansaugrohr der Pumpe zwecks geometrischer in-situ Kalibrierung (ohne Wasserfüllung gezeigt) und c) Gefittetes Kalibriergitter, jeweils auf beiden Ebenen der Kalibrierplatte basierend auf den Punktmarkern (Der Abstand zwischen den Ebenen beträgt 1 mm in z-Richtung).

Tabelle. 2: Übersicht Versuchsparameter des laser-optischen 2D3C-PIV Versuchsaufbau

Parameter		Variationsbereich	
Größe Messfeld (field of view)	FOV	52 x 60,9	mm
Nominelle optische Vergrößerung	M_0	0,27	-
Skalierungsfaktor	f_{Scale}	41,5	px/mm
Kamera		CMOS 2560 x 2160	px
Sensorgröße	l_X x l_Y	16,6 x 14,0 (6,5 µm Pixelgröße)	mm
Kamera-Stereowinkel	α	90	°
Belichtungsquelle		Nd: YAG Doppelpuls-Laser	
Nominelle Laser-Wellenlänge	λ	532	nm
Pulsenergie		200 (bei max. 15 Hz)	mJ
Lichtführung		Laserarm mit Lichtschnittoptik	
Lichtschnittdicke	Δz_0	1.5	mm
Belichtungsabstand	Δt	175 - 403	µs

Copyright © 2025 and published by German Association for Laser Anemometry
GALA e.V., Karlsruhe, Germany, ISBN 978-3-9827594-0-1

Seeding		Glashohlkugeln (Spericel)	
Mittlerer Partikel-Ø	d_P	10	µm
Dynamic velocity range[a]	DVR	260	-
Dynamic spatial range[a]	DSR	193,8	-

[a](Adrian 1997)

3 Versuchsablauf und Auswertung

Die Aufnahme der stereoskopischen Doppelbild-Paare bedingte zunächst eine geometrische Kalibrierung des PIV-Aufbaus unter Versuchsbedingungen, d.h. dem wassergefüllten Ansaugrohr sowie dem umgebenden Wasserbassin inkl. Wasserdreiecken. Im Weiteren wurde hierzu die motorseitige Gehäusehälfte der Pumpe demontiert, um einen freien Zugang zum Ansaugrohr und der damit verbundenen Platzierung den 3D-Kalibirerplatte durch die Pumpe im Ansaugrohr zu ermöglichen (vgl. Abb. 3 b)). Hierzu wurde ein separater Kalibrieraufbau genutzt, welcher in Abb. 4 dargestellt ist. Für die geometrische Kalibrierung wurden 50 Doppelbildpaare erfasst. Nach erfolgter geometrischer Kalibrierung wurde der Prüfstand entsprechend Abb. 3 für die Versuchsreihen umgebaut und die Gehäusehälfte der Pumpe als auch der Antriebsmotor wieder in den Prüfstand integriert. Die Antriebswellen wurden mittels Laserausrichtmessung (TKSA 31, SKF) ausgerichtet. Laserreflektionen am Randbereich des Rohres wurden zunächst mittels Bildvorverarbeitung eliminiert. Die Vorverarbeitung umfasste zunächst die Subtraktion der gleitenden Intensitätsminima für jeden Pixelwert, gefolgt von einem räumlichen Hochpassfilter zur überwiegenden Entfernung stationärer Laserreflexionen. Weiter wurden die vorverarbeiteten Rohbilder aufgrund der vorhandenen Schwingungen des Messaufbaus mittels Schwingungskorrektur, basierend auf einem stationären Fixpunkt in allen Rohbildern, korrigiert. Anschließend wurde die Kreuzkorrelation auf die Bildpaare in mehreren Durchläufen angewendet. Die initiale Auswertefenstergröße betrug 96 x 96 Pixel mit 50 % Überlappung, gefolgt von drei Iterationen mit einer finalen Fenstergröße von 48 x 48 Pixeln und 75 % Überlappung. Dies ergibt eine räumliche Auflösung von 0,51 mm zwischen benachbarten Vektoren (in- plane). Ausreißer wurden mittels „universal outlier detection“ (Westerweel und Scarano 2005) detektiert, um fehlerhafte Vektoren zu identifizieren und zu entfernen, wenn das lokale Residuum > 2,0 Pixel betrug, und Wiedereinfügung, wenn das lokale Residuum < 3,0 Pixel betrug. Der Filter wird in Bereichen von 3 x 3 Vektoren angewendet. Fehlerhafte Vektoren wurden mittels Median-Filter ersetzt. PIV-Messabweichungen wurden mit der „correlation statistics“ Methode in Davis berechnet (Wieneke 2015, Sciacchitano und Wieneke 2016).

Im Rahmen dieses Beitrages wurden vier Förderströme im Bereich zwischen 50 und 115 % des Nennförderstroms bei einer konstanten Nenndrehzahl von 2900 min^{-1} angefahren. Die Justage des Förderstrom erfolgte mittels Drosselschieber auf der Druckseite. Nach Erreichung eines stationären Betriebszustands wurde die Bildaufnahme der Rohbilder in DaVis 10 (LaVision) gestartet, bei einer Aufnahmerate von 5 Hz wurden jeweils 4000 Doppelbildpaare über Sequenzen von jeweils ca. 13,3 Minuten erfasst. Der Belichtungsabstand zwischen den Doppelpulsen lag im Bereich zwischen 87 µs ($q^* = 1,15$) und 201 µs ($q^* = 0,5$).

4 Ergebnisse und Diskussion

In Abb. 4 sind zunächst die mittleren Geschwindigkeitsprofile der jeweils 3 mittels Stereo-PIV vermessenen Lastpunkte dargestellt. Die mittlere Geschwindigkeit ist jeweils als das Ensemble-Mittel über alle Vektorfelder, normiert mit der mittleren Strömungsgeschwindigkeit

Copyright © 2025 and published by German Association for Laser Anemometry
GALA e.V., Karlsruhe, Germany, ISBN 978-3-9827594-0-1

berechnet worden und jeweils als Kontourplot für die axiale Geschwindigkeitskomponente U_Z und die radiale Geschwindigkeitskomponente U_Y dargestellt. Das Referenzkoordinatensystem ist in Abb. 3 dargestellt.

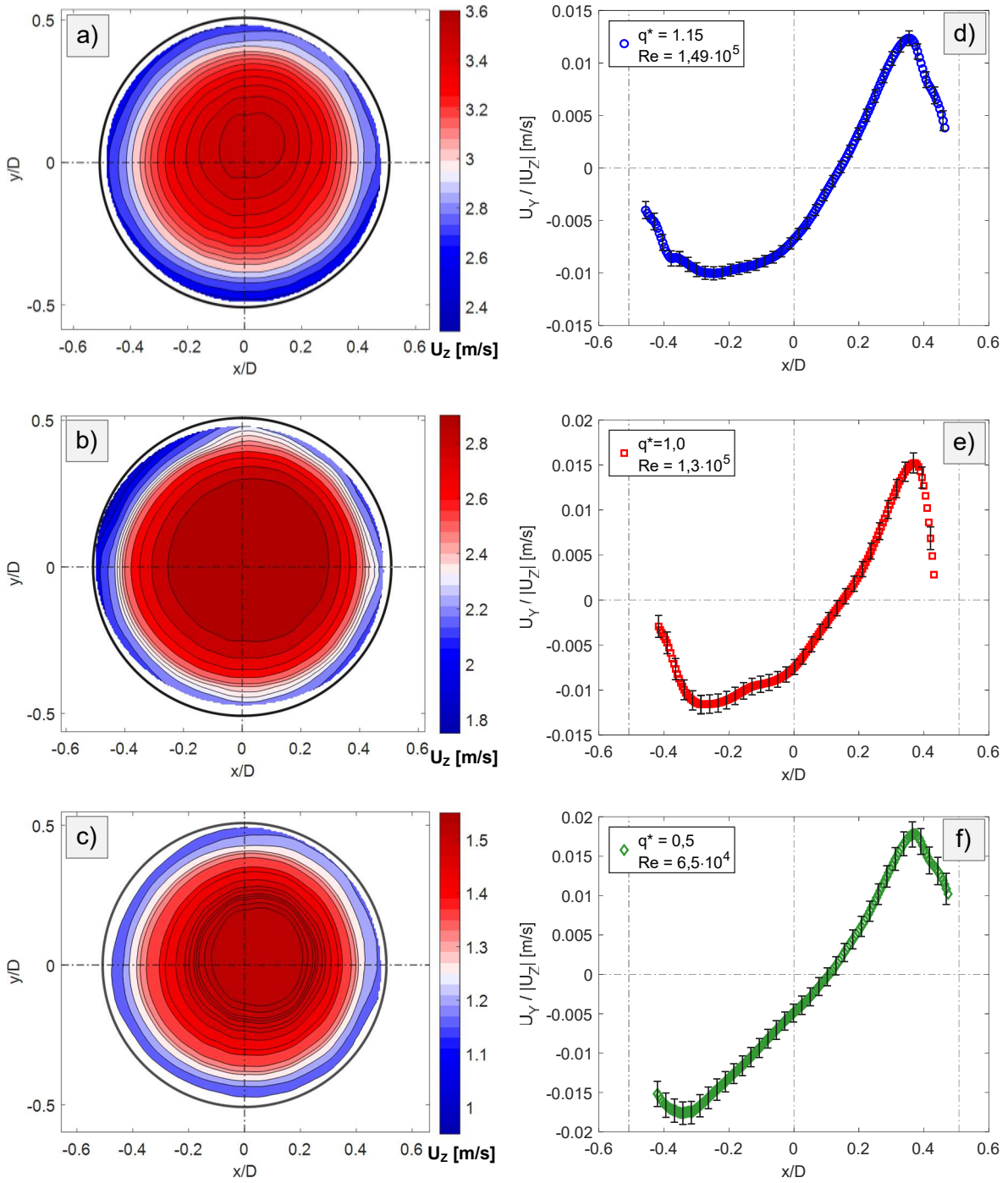

Abb. 4: Verlauf der mittleren Geschwindigkeitsprofile gemessen mittels stereoskopischer 2D3C-PIV im Ansaugrohr der Pumpe 2·D stromaufwärts des Saugstutzens Für relative Förderströme $q^* = Q/Q_N$ = 0,5 – 1,0 und 1.15 jeweils als Ensemble-Mittel über 4000 Einzelvektorfelder (a) – c) und instantane Aufnahme (d) – f)). Die Fehlerbalken zeigen das 95 % Vertrauensintervall ($\pm 2\sigma$).

Copyright © 2025 and published by German Association for Laser Anemometry
GALA e.V., Karlsruhe, Germany, ISBN 978-3-9827594-0-1

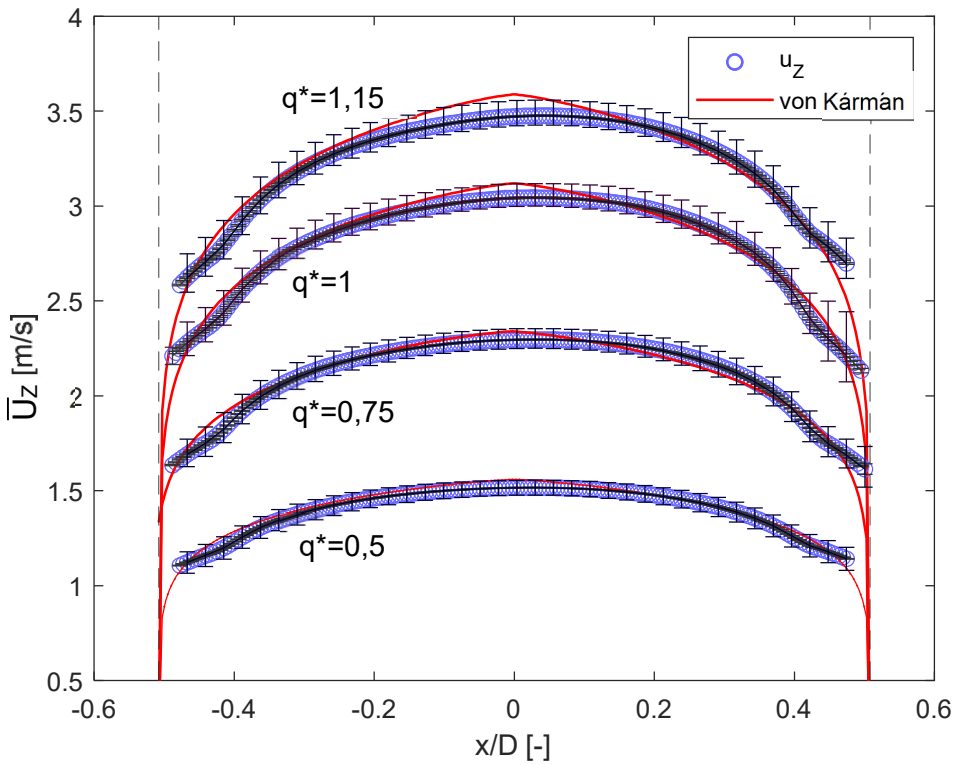

Abb. 5: Verlauf der gemittelten axialen Geschwindigkeitskomponente U_Z über dem Rohrquerschnitt x/D bei y/D = 0, für die vier vermessenen Volumenströme q* = 0,5, 0,75, 1,0 und 1,15. Vergleichend sind die nach von Karman (von Kàrmàn 1921) mittels Potenzansatz berechneten Geschwindigkeitsprofile eingezeichnet.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieses Beitrags wurden flächige 2D3C-Geschwindigkeitsverteilungen im Einlaufbereich einer einstufigen Normkreiselpumpe mittels stereoskopischer Particle Image Velocimetry (Stereo-PIV) präsentiert. Hierzu wurde Messungen bei einer Pumpennenndrehzahl von 2900 min^{-1} bei insgesamt 4 Drosselpunkten im Teillastbereich q* Q_N/Q = 0,5, 0,75, 1,0 und Überlastbereich der Pumpe q* = 1,15 durchgeführt. Die Korrespondierenden Reynolds Zahlen lagen, bezogen auf der mittleren Strömungsgeschwindigkeit im Ansaugrohr, zwischen Re = $(U_M \cdot D/\nu) = 6{,}48 \cdot 10^4$ und Re = $1.5 \cdot 10^5$. Der Messquerschnitt lag senkrecht zur Rohrmittelachse in einer axialen Entfernung von 2 Rohrinnen-Durchmessern stromaufwärts des Saugstutzens der Pumpe (vgl. Abb. 2). Die ersten Ergebnisse zeigen gute Übereinstimmung der mittleren Geschwindigkeitsprofile mit der gängigen Theorie (vgl. von Kármán 1921) für die erwartbare Form der mittleren turbulenten Strömungsprofile für Reynolds Zahlen im Bereich zwischen Re = $6{,}48 \cdot 10^4$ - $1.5 \cdot 10^5$. Eine wandnahe Rückströmung konnte im Rahmen der vorliegenden Messungen jedoch nicht beobachtet werden und muss durch weitere Messungen auch bei kleineren relativen Förderströmen q* < 0,5 und variierenden Messpositionen entlang der Rohrachse untersucht werden.

Copyright © 2025 and published by German Association for Laser Anemometry
GALA e.V., Karlsruhe, Germany, ISBN 978-3-9827594-0-1

Literatur

Adrian, R. J., Westerweel, J. (2011): Particle image velocimetry. Cambridge Univ. Press (Cambridge aerospace series, 30)..

Bruegelmans, F. A. E., Sen, M., 1982: “Prerotation and fluid recirculation in the suction pipe of centrifugal pumps”, Proceedings of the 11th Turbomachinery Symposium, Texas A&M University, Turbomachinery Laboratories.

Fraser, W. H., 1981: “Flow recirculation in centrifugal pumps”, Proceedings of the 10th Turbomachinery Symposium, Texas A&M University. Turbomachinery Laboratories.

Guelich, J. F., 2013: “Kreiselpumpen. Handbuch für Entwicklung, Anlagenplanung und Betrieb”, Springer, Berlin Heidelberg.

Keane, R. D., Adrian, R. J., 1990: Optimization of particle image velocimeters. I. Double pulsed systems. In: Meas. Sci. Technol. 1 (11), S. 1202–1215.

Ladwig, M., Wolf Pozzo, C., Lindken, R., 2021: Vergleichende Untersuchung einer schwingungs- und druckbasierten Condition Monitoring Anwendung am Beispiel einer Normkreiselpumpe. Fachtagung “Experimentelle Strömungsmechanik”, 7.–9. September 2021, Bremen.

Murakami, M., Heya, N., 1966: Swirling flow in suction pipe of centrifugal pumps: 1st Report, Distribution of velocity and energy. Bulletin of JSME 9 (34), S. 328–337.

Prasad, A. K., Jensen, K., 1995: Scheimpflug stereocamera for particle image velocimetry in liquid flows. Appl. Opt. 34, S. 7092-7099.

Prasad, A. K. 2000: Stereoscopic particle image velocimetry. *Exp. in Fluids* 29 (2), S. 103–116.

Sciacchitano, A., Wieneke, B., 2016: PIV uncertainty propagation. *Meas. Sci. Technol.* 27 (8), S. 84006.

Schlichting, H., Gersten, K., 2006: Grenzschicht-Theorie. 10. Aufl. Berlin/Heidelberg, Springer-Verlag.

Westerweel, J., Scarano, F., 2005: Universal outlier detection for PIV data. *Exp. in Fluids* 39 (6), S. 1096–1100.

Westerweel, J., van Oord, J. ,2000: Stereoscopic PIV measurements in a turbulent boundary layer. In Stanislas M., Kompenhans J., & Westerweel J. (Eds.), Particle image velocimetry: Progress towards industrial application (pp. 459-478). Kluwer.

Wieneke, B., 2005: Stereo-PIV using self-calibration on particle images. *Exp. in Fluids* 39 (2), S. 267–280.

Wieneke, B., 2015: PIV uncertainty quantification from correlation statistics. Meas. Sci. Technol. 26 (7), S. 74002.

Willert, C., 1997: Stereoscopic digital particle image velocimetry for application in wind tunnel flows. *Meas. Sci. Technol.* 8 (12), S. 1465–1479.

Copyright © 2025 and published by German Association for Laser Anemometry
GALA e.V., Karlsruhe, Germany, ISBN 978-3-9827594-0-1