

## **VERGLEICH PHASENGEMITTELTER LDA MESSUNGEN MIT ERGEBNISSEN DER STRUKTURMITTELUNG**

### **COMPARISON OF PHASE AVERAGED LDA MEASUREMENTS WITH RESULTS FROM STRUCTURE AVERAGING TECHNIQUE**

**Mario Jensch und Alfred Leder**

Universität Rostock,  
Lehrstuhl Strömungsmechanik,  
Albert-Einstein-Strasse 2,  
18059 Rostock

**Umströmung stumpfer Körper, Abgelöste Strömung, Phasenaufgelöste LDA, POD,  
Strukturmittelung**

**Bluff body wake, separated flow, phase averaged LDA, POD, structure averaging**

#### **Zusammenfassung**

Im vorliegenden Beitrag wird die instationäre Umströmung eines einseitig begrenzten Kreiszylinderstumpfs bei einer Reynoldszahl von  $Re = 200000$ , bezogen auf den Zylinderdurchmesser  $D$  experimentell untersucht. Für das Erfassen der Geschwindigkeitsverteilung in einem Volumen im Nachlauf kommen zwei optische Messverfahren zum Einsatz. Zum einen wird die phasenaufgelöste, drei Komponenten Laser-Doppler-Anemometry (PA-LDA) benutzt, zum anderen kommt die zeitauflösende Stereo-Particle-Image-Velocimetry (TR-PIV) zu Einsatz. Bei der PA-LDA Messung wird der Triggermechanismus auf die Phase der Primärwirbelstrasse angewendet, wobei die Phasenlage jeder gemessenen LDA-Geschwindigkeitsinformation durch ein Hitzdrahtanemometersignal bestimmt wird. Im Rahmen der Strukturmittelung der TR-PIV-Daten berechnet sich die Phasenlage der Geschwindigkeitsinformationen aus den Fourier-Koeffizienten der Proper Orthogonal Decomposition (POD). Die Bestimmung der Phasenlage direkt aus dem Strömungsfeld bedarf somit bei der POD-Technik keines externen Triggers. Der zeitliche Verlauf wird jeweils in 16 Phasenwinkel eingeteilt, über die anschließend eine Ensemblemittelung durchgeführt wird. Das  $\lambda_2$  Wirbelkriterium (Jeong & Hussain [1995]) und instantane Stromlinien veranschaulichen die Topologie der Wirbelstrukturen.

#### **Einleitung**

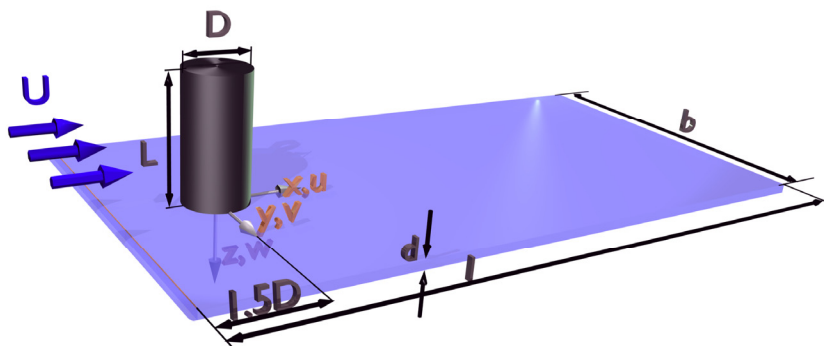
Die Umströmung von einseitig begrenzten Zylindern mit kleinem Längen- Durchmesser Verhältnis wird seit mehreren Jahren experimentell und numerisch untersucht. Das Interesse liegt in der komplexen, dreidimensionalen und instationären Strömungsstruktur begründet, welche sich aufgrund von Scherschichtinstabilitäten und Ablösephänomenen bildet. Ähnliche Strömungsstrukturen treten in Natur und Technik, wie beispielsweise bei der Fahrzeug- oder Gebäudeaerodynamik, auf. Dennoch ist die Zahl der Veröffentlichungen, die darüber hinaus meist nur stationäre Ergebnisse beinhalten, sehr begrenzt. Pattenden et al. [2005] stellen eine detaillierte Zusammenfassung der bereits durchgeführten experimentellen Untersuchungen vor. In Oschatz et al. [2002], Leder [2003], Richter & Leder [2005] und Jensch et al. [2006, 2007] wurden bereits zeitlich gemittelte Ergebnisse aus LDA und TR-PIV Messungen

an einem einseitig begrenzten Kreiszyylinderstumpf mit einem Längen- Durchmesser Verhältnis von zwei diskutiert. Eine Analyse der Strömungsdynamik auf Basis von PA-LDA Messungen führten Jensch et al. [2009a] durch. Zusätzlich leiteten die Autoren aus der Datenbasis ein einfaches instationäres Wirbelmodell ab.

Durch die Verwendung eines ortsfesten Phasentriggers kann im Rahmen von PA-LDA Messungen nur ein instationäres Phänomen aufgelöst werden. Die Analyse weiterer instationärer Phänomene bedarf erneuter Messungen mit variablen Triggerschaltungen. Dies erfordert einen erheblichen Aufwand. Einen viel versprechenden Ansatz stellten Jensch et al. [2009b] in Form eines Strukturmittelungsverfahrens für TR-PIV vor. Im Rahmen dieses Beitrags werden beide Verfahren verglichen und die Potentiale des zweiten Ansatzes aufgezeigt.

## Experimenteller Aufbau

Objekt der Untersuchungen ist ein einseitig begrenzter Kreiszyylinderstumpf mit einem Längen- Durchmesser Verhältnis von zwei. Die Untersuchungen wurden in einem Windkanal Göttinger Bauart mit einer  $0.6 \times 0.6 \text{ m}^2$  offenen Messtrecke bei einer Anströmgeschwindigkeit von  $U_\infty = 26 \text{ m/s}$  durchgeführt. Dadurch ergibt sich eine auf den Zylinderdurchmesser bezogene Reynoldszahl von  $Re = 200000$ . Bei diesem Wert liegt gerade noch eine laminare Zylinder Grenzschicht vor. Ein an der profilierten Vorderkante der Platte angebrachter Transitionsdraht fixiert den Umschlagspunkt der Plattengrenzschicht. Somit wird die Ausdehnung des sich bildenden Hufeisenwirbelsystems gering gehalten (Baker [1979, 1980]).



Zylinder Geometrie  
 Durchmesser  $D = 120 \text{ mm}$   
 Länge  $L = 2D$   
 Transitionsdraht  $x_0 = -1.5D$

Geometrie Endscheibe  
 $b = 5.833 D$   
 $l = 10.833 D$   
 $d = 0.15 D$

Strömungsparameter  
 $Re_D = 200000$   
 $U_\infty = 26 \text{ m/s}$   
 Turbulenzgrad  $Tu = 0.5\%$

Abb.1: Skizze des Versuchsaubau

Für die experimentelle Arbeit wird ein drei Komponenten Laser-Doppler-Anemometer (3C-LDA) mit Phasentriggermechanismus verwendet. Das 3C-LDA verwendet einen 500 mW Argon Ionen Laser mit 514 nm und 488 nm Wellenlänge und einem 100 mW frequenzverdoppelter Nd:YAG Laser. Dieser Aufbau ermöglicht eine Datenrate von 700-1000 Hz koinzident gemessener Geschwindigkeitsinformationen. Der Triggermechanismus wird über ein Hitzdrahtanemometer realisiert, welches simultan zur Geschwindigkeitsmessung die Ablöseperioden der Primärwirbelstrasse aufnimmt. Das gemessene Signal wird mit Hilfe eines analogen Bandpassfilters vorkonditioniert. Im zweiten Schritt wird aus dem aufbereiteten Hitzdrahtsignal bei Beginn jeder Ablöseperiode ein TTL-Puls generiert. Diese Pulse werden von den LDA-Prozessoren zusätzlich aufgezeichnet. So ist es im Postprocessing möglich, jeder koinzident gemessenen Geschwindigkeitsinformation einen Phasenwinkel zuzuordnen und anschließend eine Phasenmittelung durchzuführen. Vorgestellt wurde diese Verfahren von Leder & Geropp [1988]. Darüber hinaus wendeten Brede & Leder [2002] diese Methode erfolgreich auf die Umströmung eines Kreiszyinders mit großem Längen- Durchmesser Verhältnis an. Die Position des Hitzdrahtsensors liegt bei  $x/D = 2.4$  und  $y/D = -1.2$ .

Als zweite Messtechnik kam ein zeitauflösendes Stereo-PIV System zum Einsatz, welches eine Messung von ebenen Geschwindigkeitsfeldern bei 1 kHz und mehr ermöglicht (Jensch et al. [2006]). Dieses besteht aus einem frequenzverdoppelten, diodengepumpten Nd:YAG Laser und zwei Hochgeschwindigkeits- CMOS Kameras. Durchgeführt wurden die Messungen bei einer effektiven Messfrequenz von 1 kHz. Für die Auswertung wurde eine adaptive Korrelation mit Subpixel-Abtastung verwendet. Die Größe der Abtastflecken betragen  $32 \times 32$  Pixel<sup>2</sup> und der Überlapp der Abfragefenster 50%.

## Methode

Aufbauend auf der POD-Analyse wurde ein Verfahren entwickelt, mit dem es möglich ist, die räumliche Verteilung sowie den zeitlichen Verlauf der kohärenten Strukturen zu rekonstruieren (Jensch et al [2009b]). So können gezielt unterschiedliche Strukturen im Strömungsfeld analysiert werden. Das Verfahren besteht aus der Ähnlichkeitsanalyse von Moden in parallelen Ebenen und der Phasenmittelung anhand der Fourier-Koeffizienten.

Ausgangspunkt für die Zerlegung mittels POD im Ortsbereich ist ein an  $M$  diskreten Zeitpunkten  $t_m$  gemessenes Schnappschussensemble  $\{u^m(x)\}_{m=1}^M := u(x, t_m)$  des Strömungsfeldes. Ziel ist es, zu diesem Ensemble ein orthonormales System von Moden zu finden, welche die Galerkin Approximation

$$u(x, t_m) := \sum_{i=0}^M a_i(t_m) u_i(x) \quad 1.)$$

im energetisch optimalen Sinne beschreiben. Der erste Fourier-Koeffizient nimmt den Wert  $a_0 = 1$  an. Die zugehörige Mode  $u_0 = \bar{u}$  entspricht dem zeitlich gemittelten Strömungsfeld. Die Moden  $u_i(x)$  entsprechen der Orthonormalbasis, die das Feld mit der geforderten Eigenschaft beschreibt. Die Fourier-Koeffizienten  $a_i(t_m)$  repräsentieren die Projektion des Schnappschusses auf die zugehörige Mode und beinhalten aufgrund der Orthonormalität der Moden die kinetische Energie der instationären Strömung.

Im zweiten Schritt wird ein Volumen der planar vorliegenden POD Moden rekonstruiert. Hierfür wird die von Jensch et al. [2008a,b] eingeführte lineare Abhängigkeit der Moden auf Basis des Skalarproduktes bestimmt.

$$u_i^1(x) = C_{i,j}^{1,2} u_j^2(x) \quad 2.)$$

Auf die Berechnung einer geordneten räumlichen Verteilung der Moden schließt sich die zeitliche Rekonstruktion an. Hierfür ist es notwendig, die berechneten volumetrischen Moden wieder mit ihren Fourier-Koeffizienten zu rekombinieren. Daraus ergibt sich das Problem, dass jede Mode in jeder Ebene ihren zugehörigen Fourier-Koeffizienten besitzt. Diese stellen die Projektion des jeweiligen Schnappschusses auf die Mode und somit den zeitlichen Verlauf der Schnappschüsse dar. Die Skizze in Abb. 2 veranschaulicht diesen Zusammenhang gut. Ist die kinetische Energie zweier aufeinander folgenden Moden gleich, beschreibt das Phasenporträt der Fourier-Koeffizienten eine Kreisbahn und eine Bestimmung der Phasenlage ist direkt aus den Koeffizienten möglich. Im Falle eines unterschiedlichen Energiegehalts der Moden beschreiben die Koeffizienten die Bahn einer Ellipse. Aus diesem Grund ist es von Vorteil, die Fourier-Koeffizienten vor dem Bestimmen der Phasenwinkel mit ihrem Energiegehalt  $\lambda_i$  zu normieren. Die Fourier-Koeffizienten sind dann orthonormal und beschreiben im Phasenporträt einen Einheitskreis, wie in Abb. 3 zu sehen.

$$\tan(\varphi) = \frac{a_2}{a_1} \sqrt{\frac{\lambda_1}{\lambda_2}}$$

3.)

Nach Gleichung 3.) lässt sich so jedem Schnappschuss exakt ein Phasenwinkel zuordnen. Die so zugeordneten Schnappschüsse werden ebenfalls in Messwert-Ensemble unterteilt und einer Mittelung unterzogen. Diese Methode ist ein starker zeitlicher Filter auf den periodischen Verlauf der zugrunde liegenden Moden. So macht es die Strukturmittelung möglich, den zeitlichen Verlauf der zugehörigen kohärenten Struktur zu untersuchen. Die Methode ist besonders wertvoll, da sie ohne externen Triggermechanismus auskommt und voneinander verschiedene periodische Strukturen aus einer Datenbasis extrahiert.

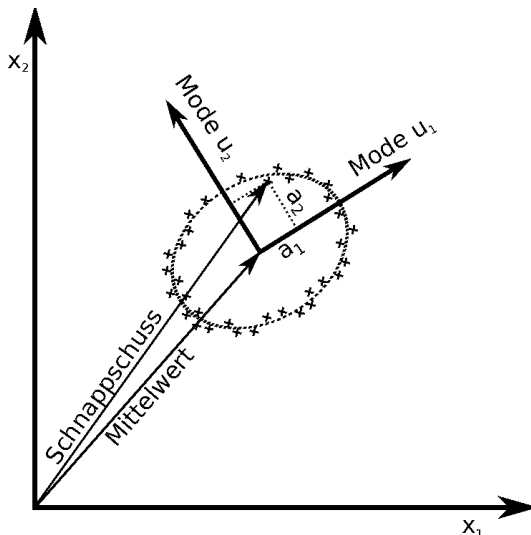


Abb. 2: Schematischer Zusammenhang von Fourier-Koeffizienten und POD-Moden

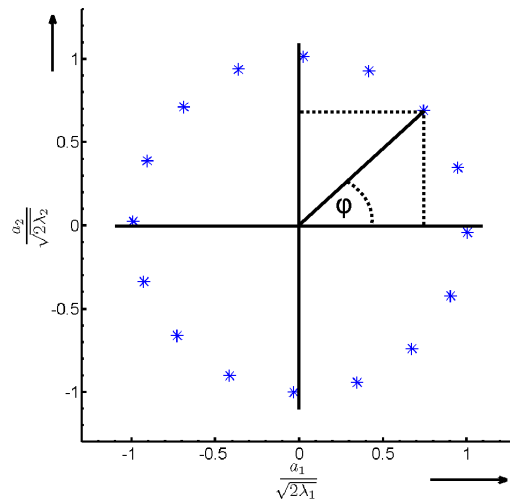


Abb. 3: Phasenportrait der ersten beiden Fourier-Koeffizienten normiert

## Ergebnisse

Eine exemplarische Analyse des Zeitschritts  $\varphi = 13/16$  in Abb. 4 lässt einen qualitativen Vergleich beider Verfahren zu. Dargestellt sind die Wirbeleinhüllenden  $\lambda_2 = -0.3$  Isoflächen. Zusätzlich werden die phasengemittelten Geschwindigkeitsfelder durch instantane Stromlinien verdeutlicht. Trotz geringer Differenzen in der Strömungstopologie ist eine gute Übereinstimmung erkennbar. Die sich seitlich am Zylinder periodisch aufrollenden Scherschichten werden durch beide Verfahren gut erfasst. Das Tornado-ähnliche Verhalten im Kern der Primärwirbel ist im Fall  $a_1$  und  $a_2$  klar zu identifizieren. Die Drehachse liegt jeweils parallel zur Zylinderachse mit negativem Drehsinn bezüglich der z-Richtung. Innerhalb der Wirbelformation liegt eine starke Geschwindigkeitskomponente in Richtung des freien Zylinderendes vor. Aufgrund des antisymmetrischen Wirbelablösens ist die Wirbelformation auf der gegenüberliegenden Zylinderseite ( $b_1$  und  $b_2$ ) um eine halbe Phasenlänge stromab verschoben. Die Drehachse ist ebenfalls parallel zur Zylinderachse orientiert und besitzt einen positiven Drehsinn bezüglich der z-Achse. Der Fluidtransport bei diesem Phasenwinkel erfolgt in beiden Fällen in Richtung der Endscheibe. Im Bereich der Symmetrieebene zeigt sich eine Diskrepanz der ermittelten Wirbelstrukturen aus beiden Verfahren. Während die PA-LDA Ergebnisse einen großräumigen, bogenförmigen Übergang mit einer Drehachse parallel zur y-Achse suggerieren, trennt die Strukturmittelung klar die seitlich aufgerollten Scherschichten. Physikalisch erfolgt diese Trennung durch das Rezirkulationsgebiet. Das Aufweiten der Fragmente der Karman'schen Wirbelstraße und Abheben von der Endscheibe, sowie der Übergang in Längswirbel werden durch beide Verfahren gut beschrieben ( $c_1$  und  $c_2$ ). Der

konvektive Abtransport der Längswirbel geschieht periodisch, wobei lediglich eine minimale Abweichung in der Lage der Struktur  $d_1$  und  $d_2$  beide Verfahren unterscheidet.

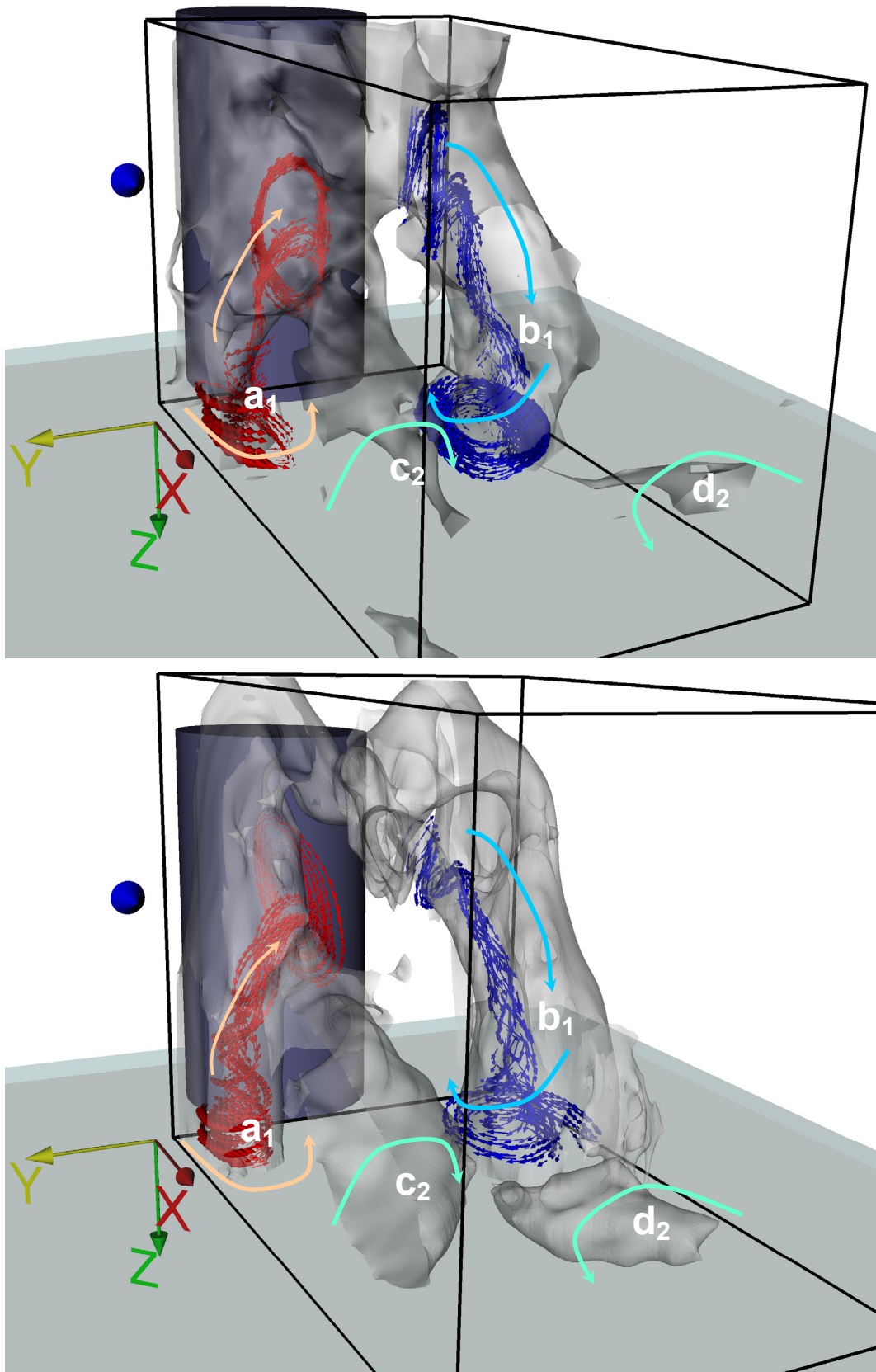


Abb. 4: Phasengemittelte Wirbelstruktur, dargestellt durch  $\lambda_2$ -Wirbeleinhüllende zum Zeitpunkt  $\varphi = 13/16$ ; oben: Ergebnisse der PA-LDA Messung, unten Ergebnisse der strukturgemittelten Daten aus TR-PIV Messungen

Im Fall der PA-LDA ist eine Tendenz des „Verschmierens“ der zeitlich abhängigen Strukturen in Richtung des zeitlich gemittelten Strömungsfeldes auffällig. Dies ist auf ein geringes Signal-Rausch-Verhältnis des Phasentriggers infolge der Überlagerung mit turbulenten Geschwindigkeitsschwankungen zurückzuführen. Da die Phasenlage im Fall der Strukturmittlung aus einem Geschwindigkeitsfeld extrahiert wird, was dem Einsatz eines feldbasierten Triggers vergleichbar wäre, zeigt dieses Verfahren eine größere Robustheit und Genauigkeit. Somit ist eine bessere strukturelle Trennung der großskaligen Strukturen möglich. Eine Phasenmittlung, basierend auf den Fourier-Koeffizienten der Moden höherer Ordnung, erlaubt eine Strukturmittlung auf Phänomene mit unterschiedlichem Energiegehalt. Hierfür bedarf es keiner erneuten Messung, wie es im Fall der PA-LDA Messung nötig wäre. Darüber hinaus entfällt die aufwendige Bestimmung einer geeigneten Triggerposition. Aufgrund des elliptischen Charakters des beschreibenden Differentialgleichungssystems im Unterschallbereich werden zusätzlich Störungen eines externen Triggers im Strömungsfeld, sowohl stromauf als auch stromab, vermieden. Weiterhin besitzt die Methode das Potential, das strukturgemittelte Geschwindigkeitsfeld mit weiteren strukturgemittelten Messgrößen zu synchronisieren. Hierfür bietet sich zum Beispiel die strukturgemittelte Wanddruckverteilung im Bodenbereich an. Abb. 5 veranschaulicht dieses. Dargestellt ist das Geschwindigkeitsfeld und das Druckfeld zum Zeitschritt  $\varphi = 5/16$ . Deutlich zu erkennen sind die mittels instantaner Stromlinien visualisierten Wirbel und deren Fußabdrücke. Die Fußabdrücke der Wirbel kennzeichnen sich in Form von Druckminima auf der Endscheibe.

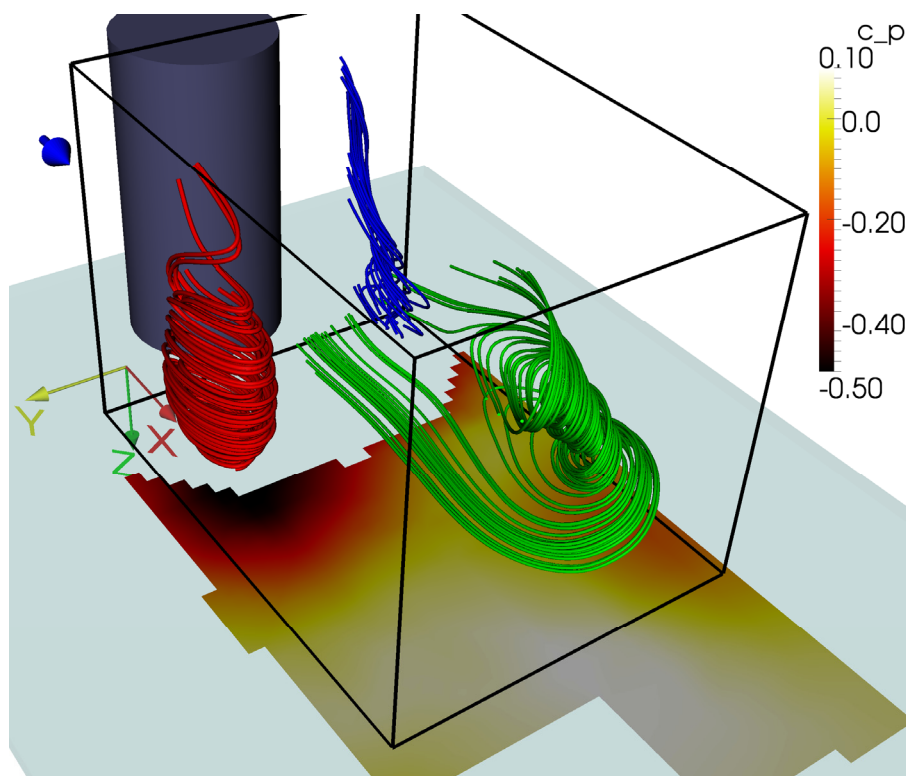


Abb. 5: Strukturgemitteltes Geschwindigkeitsfeld und Wanddruckverteilung zum Zeitschritt  $\varphi = 5/16$

## Zusammenfassung

Es wurden die Ergebnisse phasengemittelter LDA Messungen im Nachlauf eines einseitig begrenzten Zylinderstumpfs mit denen der POD-Strukturmittlung verglichen. Durchgeführt wurde die Strukturmittlung anhand gemessener Geschwindigkeitsfelder der TR-PIV Technik. Im Fall der PA-LDA Messung wurde auf die Phase der Primärwirbelstrasse im Nachlauf

getriggert. Im Rahmen der Strukturmittlung erfolgte die Bestimmung der Phasenlage durch die Fourier-Koeffizienten der ersten beiden POD Moden. Die Geschwindigkeitsinformationen wurden jeweils in 16 Phasenensembles eingeteilt und gemittelt. Der qualitative Vergleich zeigt für beide Verfahren dieselben Strukturen. Die Ergebnisse repräsentieren gut die komplexen Wechselwirkungen der primären Wirbelstrasse mit den übrigen Strömungsstrukturen im zylindernahen Nachlauf. Anhand eines exemplarischen Phasenwinkels wurde die zeitliche Entwicklung der Primärwirbel und deren bogenförmige Verbindung beschrieben. Darüber hinaus erfassen beide Verfahren den periodischen Übergang in Längswirbel. Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Ergebnisse der Strukturmittlung auf Basis der ersten beiden POD Moden mit denen der PA-LDA vergleichbar sind. Das große Potential der Strukturmittlung liegt sowohl in der höheren Genauigkeit bei der störungsfreien Bestimmung der Phasenlage, als auch in der Möglichkeit, die Dynamik periodischer Strukturen höherer Ordnung zu analysieren. Außerdem ist es möglich, diese Methode auf weitere Strömungsmessgrößen anzuwenden und die Felder somit zu synchronisieren.

### **Dankesworte**

Die Autoren bedanken sich bei der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die Förderung des Projektes im Rahmen des Schwerpunktprogramms 1147 „Bildgebende Messverfahren in der Strömungsmesstechnik“.



## Literatur

- Baker, C. J. (1979) The laminar horseshoe vortex. *Journal of Fluid Mechanics*. Vol. 95 part 2, pp. 347-367
- Baker, C. J. (1980) The turbulent horseshoe vortex. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. Vol. 6 pp. 9-23
- Brede, M., Leder, A. (2002) On the structure of turbulence in the transitional cylinder wake. *New Results in Numerical and Experimental Fluid Mechanics III, Notes Numer. Fluid Mech.* Vol. 77 pp.189 - 196, (ISBN 3-540-42696-5)
- Jensch, M., Brede, M., Richter, F., Leder, A. (2006) Verwendung des Time-Resolved Stereo-PIV Messsystems zur Ermittlung zeitaufgelöster Geschwindigkeitsfelder im Nachlauf eines Kreiszyllinders. *Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik - 14. Fachtagung der GALA e.V. 2006*. PTB Braunschweig, S. 39.1-39.8, (ISBN 3-9805613-3-X)
- Jensch, M., Brede, M., Hüttmann, F., Leder, A., Frederich, O., Wassen, E., Thiele, F. (2007) Time-Resolved Stereo-PIV Messungen im Kopfbereich und Nachlauf eines Kreiszyllinderstumpfes. *Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik - 15. Fachtagung der GALA e.V. 2007*. Universität Rostock, S. 19.1 – 19.7, (ISBN 978-3-86009-007-7)
- Jensch, M., Brede, M., Leder, A., Frederich, O., Thiele, F. (2008a) Rekonstruktion dreidimensionaler POD Moden aus experimentell ermittelten Geschwindigkeitsfeldern. *Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik - 16. Fachtagung der GALA e.V. 2008*. Universität Karlsruhe, S. 14.1-14.8, (ISBN 978-3-9805613-4-1)
- Jensch, M., Brede, M., Leder, A., Frederich, O., Thiele, F. (2008b) Use of proper orthogonal decomposition to visualize coherent structures from time resolved PIV data. *Proceedings of the 14th Int. Symp. on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, 07-10 July 2008*. Calouste Gulbenkian Foundation, Lisbon, Portugal
- Jensch, M., Brede, M., Hüttmann, F., Grebin, U., Bunse, K., Leder, A. (2009a) Untersuchung der instationären Strömungsstrukturen am einseitig begrenzten Kreiszyllinderstumpf. *Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik - 17. Fachtagung der GALA e. V. 2009*. Universität Erlangen, S. 15.1-15.8, (ISBN 978-3-9805613-5-8)
- Jensch, M., Hüttmann, F., Brede, M., Leder, A. (2009b) Optical measurements in the wake of a circular cylinder of finite length at a high Reynoldsnumber. *Imaging Measurement Methods for Flow Analysis, Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design*, Springer, Berlin Heidelberg New York. Vol. 106, pp. 185-195, (ISBN 978-3-642-01105-4)
- Jeong, J., Hussain, F. (1995) On the identification of a vortex. *Journal of Fluid Mechanics*. Vol 285, pp. 69-94
- Leder, A., Geropp, D. (1988) Phase-averaged LDA measurements in turbulent separated flows. Durão, D.F.G. (Editor): *Proceedings of the fourth International Symposium on Applications of Laser-Anemometry to Fluid Mechanics*. Lissabon, Portugal, paper 3.3
- Leder, A. (2003) 3D-flow structures behind truncated circular cylinders. *Proceedings of FEDSM'03, Fourth ASME-JSME Joint Fluids Engineering Conference*. Honolulu, USA, FEDSM2003-45083
- Oschatz, L.-G., Richter, F, Leder A. (2002) 3D-Laser-Dopplermessungen im Kopf- und Fußbereich eines Zylinderstumpfes. *Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik - 10. Fachtagung der GALA e.V. 2002*. Universität Rostock, S. 24.1-24.6, (ISBN 3-86-009-233-2)
- Pattenden, R. J., Turnock, S. R., Zhang, X. (2005) Measurement of the flow over a low-aspect-ratio cylinder mounted on a ground plate. *Experiments in Fluids*. Vol. 39, pp. 10-21.
- Richter, F., Leder, A. (2005) Wirbelstrukturen und Kraftwirkungen am Kreiszyllinder in Scherströmungen. *Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik - 13. Fachtagung der GALA e.V. 2005*. Cottbus, S. 23.1-23.8, (ISBN 3-9805613-2-1)
- Sirovich, L., (1987) Turbulence and the dynamic of coherent structures part 1-3. *Quarterly of Applied Mathematics*. Vol. 45, No. 3, pp. 516-590.