

# Instabilität der abgelösten Scherschicht im Zylindernachlauf: Ergebnisse aus 3D LDA und TR-PIV Messungen im Vergleich

M. Brede, A. Leder  
Universität Rostock, Lehrstuhl für Strömungsmechanik  
Albert-Einstein-Str. 2, 18051 Rostock

## 1 Einleitung

Im Nachlauf eines quer angeströmten Kreiszylinders lösen periodisch zylinderparallele Wirbel ab und bilden eine Wirbelstraße. Für Reynoldszahlen größer als etwa 400 entstehen zusätzlich in der abgelösten Scherschicht hinter dem Zylinder Folgen kleiner Wirbel als Ergebnis einer Kelvin-Helmholtz Instabilität der Scherschicht. In dieser Untersuchung wird die neue, zeitauflösende TR-PIV Technik „time-resolved PIV“ eingesetzt, um den Entstehungsvorgang der Scherschichtwirbel und die Wechselwirkung der Scherschicht mit den Primärwirbeln zu untersuchen. Die hier verwendete time-resolved PIV Methode [4] erlaubt eine Bildrate von 250 Bildern pro Sekunde und ermöglicht es so, die Entwicklung der Scherschichtwirbel von ihrer Entstehung in der Scherschicht bis in den Bildungsbereich der Primärwirbel zu verfolgen und ihren Einfluss auf den turbulenten Zerfall der Primärwirbel zu bestimmen.

Neben der Beobachtung der Strukturentwicklung in der abgelösten Scherschicht können mit Hilfe der time-resolved PIV Technik weitere abgeleitete Größen zur Beurteilung der Turbulenzentstehung, wie zum Beispiel die Wirbelstärkekomponente  $\omega_z$ , herangezogen werden. Die Ergebnisse werden mit vorliegenden phasen- und ereignisgetriggerten 3D LDA Daten verglichen. Letztere erlauben außerdem die Bestimmung von Reynoldsspannungstermen und der Turbulenzproduktion gezielt für den Fall der Scherschichtinstabilität. Mit Hilfe dieser Ergebnisse kann der Einfluss der Scherschichtinstabilität auf die Turbulenzentstehung im Nachlauf beurteilt werden.

Die Funktionsweise der Triggermechanismen wird kurz zusammen mit dem Versuchsaufbau im Abschnitt 2 beschrieben. Ergebnisse für die Ermittlung von Geschwindigkeitsfeldern und abgeleiteten Größen mit Hilfe von phasengetriggertem und ereignisgetriggertem 3D-LDA und mit Hilfe von TR-PIV finden sich im Abschnitt 3. Eine Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse folgt im Abschnitt 4.

## 2 LDA- und Time-Resolved PIV Messung

Den 3D LDA Versuchsaufbau im Windkanal zeigt [Abbildung 1](#). Die Zylinderlänge  $L$  beträgt 0,58 m zwischen zwei Endscheiben, die zur Abtrennung von Störungen aus dem Randbereich der Messstrecke eingesetzt werden. Bei einem Zylinderdurchmesser  $d$  von 2 cm ergibt sich ein Längen/Durchmesser-Verhältnis von 29. Bei diesem  $L/d$  bleibt die mittlere Region zwischen den Endscheiben nahezu frei von Randeinflüssen, die zeitgemittelte Strömung kann als zweidimensional angesehen werden. Der Zylindernachlauf wurde bei Reynoldszahlen von 5000, 10000 und 20000 untersucht, in dieser Arbeit werden nur Ergebnisse für  $Re = 5000$  gezeigt. Weitere Ergebnisse sind in [1] dargestellt.

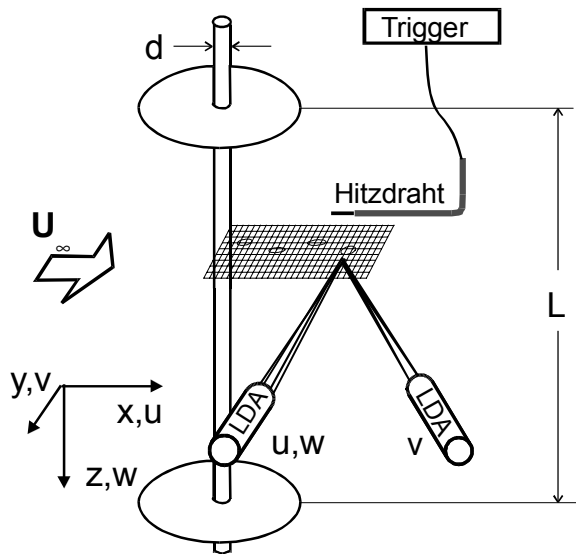


Abbildung 1: 3D-LDA Versuchsaufbau

Für die Untersuchung des Zylindernachlaufs kommt eine 3-D Laser-Doppler-Anemometrie Anlage zum Einsatz, die in koinzidenter, validierter Messung eine Datenrate von 1 kHz ermöglicht.

Zusätzlich erfasst ein Hitzdraht die Strömungsgeschwindigkeit an einem Punkt im Nachlauf. Dieses Signal dient zur Generierung zweier voneinander unabhängiger Triggerimpulse. Mit dem ersten Trigger, dem phasengesteuerten Trigger (siehe hierzu auch [3]), wird kontinuierlich der Phasenwinkel der Ablösung bestimmt und zu einem bestimmten Winkel ein Signal für jede Periode aufgezeichnet. Dieses Signal ermöglicht es, jedem LDA-Burst einen

Phasenwinkel zuzuordnen und eine Mittelung über Phasenabschnitte durchzuführen.

Der zweite Triggermechanismus, der ereignisgesteuerte Trigger, wird ermöglicht durch die gestiegene CPU-Leistung moderner Rechnersysteme. Hier wird das Hitzdrahtsignal nach einer Analog/Digitalwandlung mit Hilfe von digitalen Filtern, die softwareseitig in einer MATLAB-Umgebung realisiert wurden, auf instationäre Ereignisse hin untersucht. Bei einem Ansprechen der Filterkonfiguration wird ein Triggerimpuls erzeugt, der getrennt von den Impulsen des ersten Triggers aufgezeichnet wird. Im Postprocessing ermöglicht es dieser zweite Trigger, diejenigen Bursts zu identifizieren, die in einem Zeitfenster um das gesuchte Ereignis aufgezeichnet wurden. Eine Ensemble-Mittelung für diese Daten ermöglicht schließlich die Bestimmung der turbulenten Schwankungsgrößen und ausgewählter Bilanzgrößen speziell für diesen mit der Filterbank detektierten Ereignistyp. Eine ausführliche Beschreibung des ereignisgesteuerten Triggers findet sich in [2].

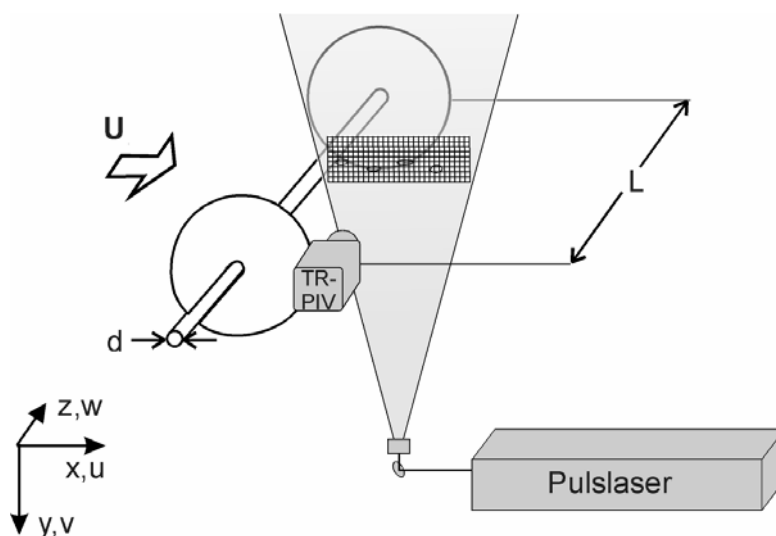


Abbildung 2: experimenteller Aufbau für das Time-Resolved PIV-Verfahren

Als Messebene wurde die Ebene orthogonal zur Zylinderachse in der Mitte zwischen den Endscheiben gewählt. Der Bereich der Messebene (Gitterweite  $\Delta = 0,1 D$ ) erstreckt sich in Strömungsrichtung von  $x/d = 0,5$  bis  $x/d = 3,0$  und quer zur Strömung von  $y/d = -1,5$  bis  $y/d = 1,5$ . Zusätzlich wurde der Bereich der abgelösten Scherschicht mit einem feineren Messgitter ( $\Delta = 0,05 D$ ) von  $x/d = 0,5$  bis  $x/d = 2,0$ , und von  $y/d = 0,4$  bis  $y/d = 1,0$  untersucht.

Der Versuchsaufbau für das TR-PIV-Verfahren ist in Abbildung 2 dargestellt. Die Modellgeometrie und die Windkanaleinstellungen stimmen mit dem Aufbau für LDA-Untersuchungen überein. Zur PIV-Aufnahme wurde mit Hilfe eines Nd-YAG Puls lasers, der eine Doppelpulsfolgefrequenz von 250 Hz erlaubt, ein Lichtschnitt erzeugt. Zur Bildaufnahme kam eine 1,2 Megapixel CCD Kamera mit entsprechend hoher Bildrate zum Einsatz.

### 3 Ergebnisse

Die beiden zuvor beschriebenen Messverfahren, 3D-LDA und TR-PIV erlauben nun eine sehr vielfältige Beobachtung des Zylindernachlaufs. Bei dem 3D-LDA Verfahren konnten die Messdaten aus dem instationären Zylindernachlauf konventionell zeitlich gemittelt, mit Hilfe eines Phasentriggeres in einzelnen Ablösephasen gemittelt und mit dem Ereignistrigger [3] ensemble-gemittelt für die Scherschichtinstabilität dargestellt werden. Von besonderer Relevanz für die Analyse der abgelösten Scherschicht hat sich die Bestimmung der Turbulenzproduktion herausgestellt. Dieser Produktionssterm der k-Bilanzgleichung ergibt sich aus:

$$P_{\text{turb}} = -\rho \left( \overline{u'^2} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \overline{u'v'} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \overline{u'w'} \frac{\partial \bar{w}}{\partial x} + \overline{u'v'} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \overline{v'^2} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \overline{v'w'} \frac{\partial \bar{w}}{\partial y} + \overline{u'w'} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} + \overline{v'w'} \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} + \overline{w'^2} \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} \right)$$

Bei der TR-PIV Methode liegt die zeitliche Auflösung mit 250 Hz eine Größenordnung unter der des LDA. Hier wird insbesondere die Wirbelstärkekomponente  $\omega_z$  zur Beobachtung der Scherschicht herangezogen. Ebenso wie für LDA kann auch in einer TR-PIV-Serie eine Ensemblemittlung für eine Reihe von Intervallen der Phase der Primärwirbelablösung durchgeführt werden.

Abbildung 3 zeigt die Ergebnisse von Detailmessungen im Bereich der abgelösten Scherschicht. Der Zylindermittelpunkt liegt bei  $x/D = y/D = 0$  links unterhalb des gezeigten Ausschnitts. In der Abbildung werden farbcodiert die Wirbelstärkekomponente  $\omega_z$  für die Messverfahren 3D-LDA phasengemittelt, TR-PIV phasengemittelt und TR-PIV-Einzelbild gegenübergestellt und zum Vergleich die Turbulenzproduktion für die Verfahren 3D-LDA phasengemittelt und 3D-LDA ereignisgemittelt dargestellt. Gleichzeitig sind für alle Felder die zwei Komponenten der Strömungsgeschwindigkeit in der Ebene als Vektoren eingetragen. Die Reynoldszahl beträgt in allen Feldern einheitlich  $Re = 5000$ . In den obersten beiden Feldern, die mit phasengemittelter LDA bestimmt wurden, ist der Bereich der Scherschicht zwischen Außenströmung und Rückströmgebiet als einheitlicher Bereich mit hohen Werten für die Wirbelstärke und die Turbulenzproduktion zu erkennen. Zum ablösenden Primärwirbel hin, dessen Zentrum bei  $x/d = 1,6$  außerhalb des Bildausschnitts liegt, nehmen beide Größen ab. Werden die LDA-Messungen hingegen mit einer ereignisgesteuerten Triggerung durchgeführt, die eine Selektion der Daten für den Fall einer instabilen Scherschicht ermöglicht, so treten in der Verteilung der Turbulenzproduktion, hier im dritten Feld gezeigt, periodische Maxima auf. Für  $Re = 5000$  sind diese zu erkennen bei  $x/d = 1,0$ ;  $1,45$  und  $1,9$ . Bei höheren Reynoldszahlen nehmen die Abstände ab und die Signifikanz der Maxima zu. Die Wellenlängen dieser periodischen Scherschichtwirbel stimmen mit den Wellenlängen der in Hitzdrahtmessungen beobachteten Kelvin-Helmholtz-Wirbel in der abgelösten Scherschicht gut überein.

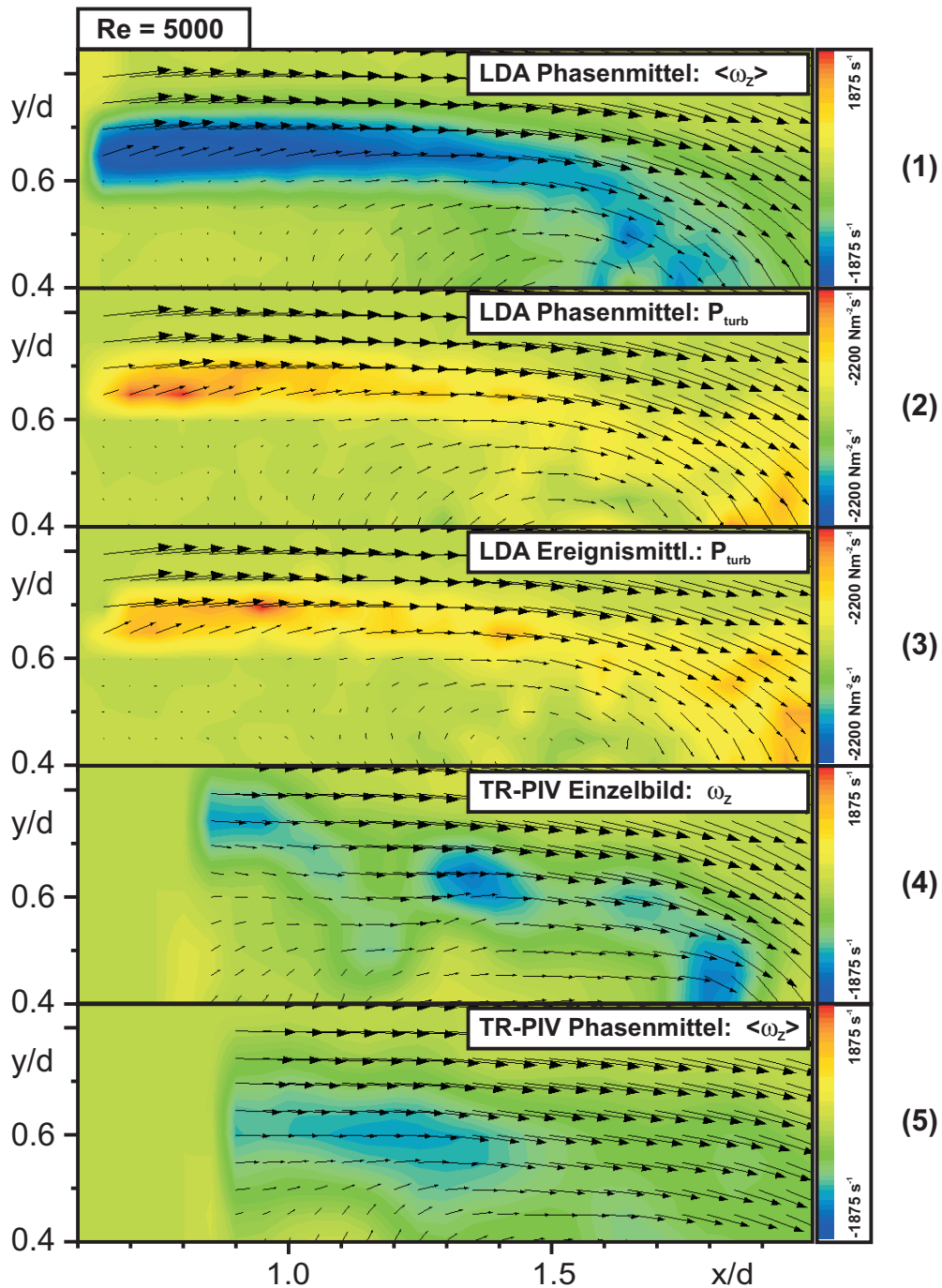


Abbildung 3: Geschwindigkeitsfelder in der abgelösten Scherschicht im Zylindernachlauf bei  $Re = 5000$ , phasen- und ereignisgetriggerte LDA-Ergebnisse, sowie einzelne und phasengemittelte TR-PIV-Felder im Vergleich

Für das Feld 4 in Abbildung 3 wurde aus der mit 250 Hz aufgenommenen TR-PIV Sequenz ein Einzelbild ausgewählt, das den entsprechenden Zustand einer instabilen Scherschicht deutlich zeigt. Die hier auftretenden Maxima in der Wirbelstärke entsprechen hinsichtlich der Lage und Periodizität genau dem mit ereignisgetriggelter LDA beobachteten Fall im Feld 3. In Feld 5 wird zum Vergleich eine passende Phase einer über wenige Perioden durchgeführten Phasenmittelung in den TR-PIV-Daten gezeigt. Dort ist die periodische Instabilität der Scherschicht nicht mehr zu erkennen.

Eine Sequenz aus TR-PIV Einzelbildern ist in der Abbildung 4, rechts einer entsprechenden Sequenz aus phasengemittelten Feldern aus der 3D-LDA-Messung links gegenübergestellt. Die Farbdarstellung zeigt in beiden Fällen die Wirbelstärkekomponente  $\omega_z$  mit gleicher Skalierung wie in Abbildung 3, wieder sind auch die Geschwindigkeitskomponenten in der Ebene als Vektoren dargestellt.

Im Vergleich sind zunächst die durch die Phasenmittelung bedingten Effekte auffallend. In den phasengemittelten, mit LDA bestimmten Feldern links ist die Nachlaufstruktur in wenige, klar unterscheidbare Bereiche aufgeteilt. Es sind die ablösenden Scherschichten, der neu entstehende Wirbel (dunkel/blau), der ablösende Wirbel (hell/rot) und das Rezirkulationsgebiet einfach abzugrenzen. Demgegenüber ist bei den aus Momentaufnahmen zusammengesetzten TR-PIV-Sequenzen rechts die Nachlaufstruktur komplexer, es treten kleinere Wirbelstrukturen insbesondere in den ablösenden Scherschichten auf, wie schon bei Abbildung 3 beobachtet (Feld 3 und 4). Die zuvor beschriebene grobskalige Nachlaufstruktur hingegen stimmt sowohl hinsichtlich der räumlichen Lage als auch der zeitlichen Entwicklung sehr gut mit der LDA-Sequenz überein. Ein weiterer, von der Phasenmittelung bedingter Effekt ist die geringere Amplitude der Wirbelstärke in den gemittelten Feldern. Bei den TR-PIV Einzelbildern liegt aufgrund der Ausbildung lokaler Maxima die größte Wirbelstärke etwa ein Drittel über der in den phasengemittelten LDA-Feldern.

Betrachtet man in der TR-PIV Sequenz die kleinskalige Wirbelstruktur in der abgelösten Scherschicht genauer, ergeben sich Unterschiede zum phasengemittelten Feld. Die kleinskaligen Wirbel bilden sich aus einer Wellenstörung in der abgelösten Scherschicht (1/16, rechts und 3/16, rechts in Abbildung 4) und werden außen um den neu entstehenden Primärwirbel angelagert (7/16, rechts und 9/16, rechts). Der Ring kleinskaliger Wirbel um den Primärwirbel zeigt deutlich höhere Werte für die Wirbelstärke als der Primärwirbel selbst. In den phasengemittelten mit LDA bestimmten Feldern (Abbildung 4, links) sind die kleinskaligen Wirbel nicht erkennbar, das Maximum für  $\langle \omega_z \rangle$  liegt hier am Wirbelkern. Weiter stromab ist ein gleichmäßiges Absinken der Wirbelstärke zu erkennen. Als Ursache ist hier der Zerfall der Primärwirbel in zahlreiche kleinere Wirbelstrukturen, die aus dem Ring an kleinskaligen Wirbeln, ursprünglich aus der Scherschicht, hervorgehen, anzusehen. Dieser Prozess ist aufgrund der Phasenmittelung in den 3D-LDA Felder nicht direkt, sondern nur an der Abnahme der Wirbelstärke und den turbulenten Schwankungsgrößen (hier nicht dargestellt) zu erkennen.

#### 4 Diskussion

Die Untersuchung instationärer abgelöster Strömungen, die dreidimensionale Wirbelstrukturen aufweisen, verlangt ein Höchstmaß an räumlicher und zeitlicher Auflösung der verwendeten Messverfahren. Im vorangegangenen Abschnitt wurden Ergebnisse dargestellt, die mit zwei unterschiedlichen optischen Messtechniken im Nachlauf eines quer angeströmten Kreiszyinders erzielt wurden. Der Zylindernachlauf weist dabei verschiedene, voneinander unabhängige Instabilitätsmechanismen auf, die dazu führen, dass gleichzeitig die periodische Ablösung von Primärwirbeln und die intermittente, kurzzeitperiodische Wirbelbildung in der abgelösten Scherschicht beobachtet werden müssen. Zusätzlich treten das Primärwirbelsystem und das Kelvin-Helmholtz-Wirbelsystem in der abgelösten Scherschicht in Wechselwirkung zueinander und bewirken einen turbulenten Zerfall der Wirbelstruktur.

# 17.6

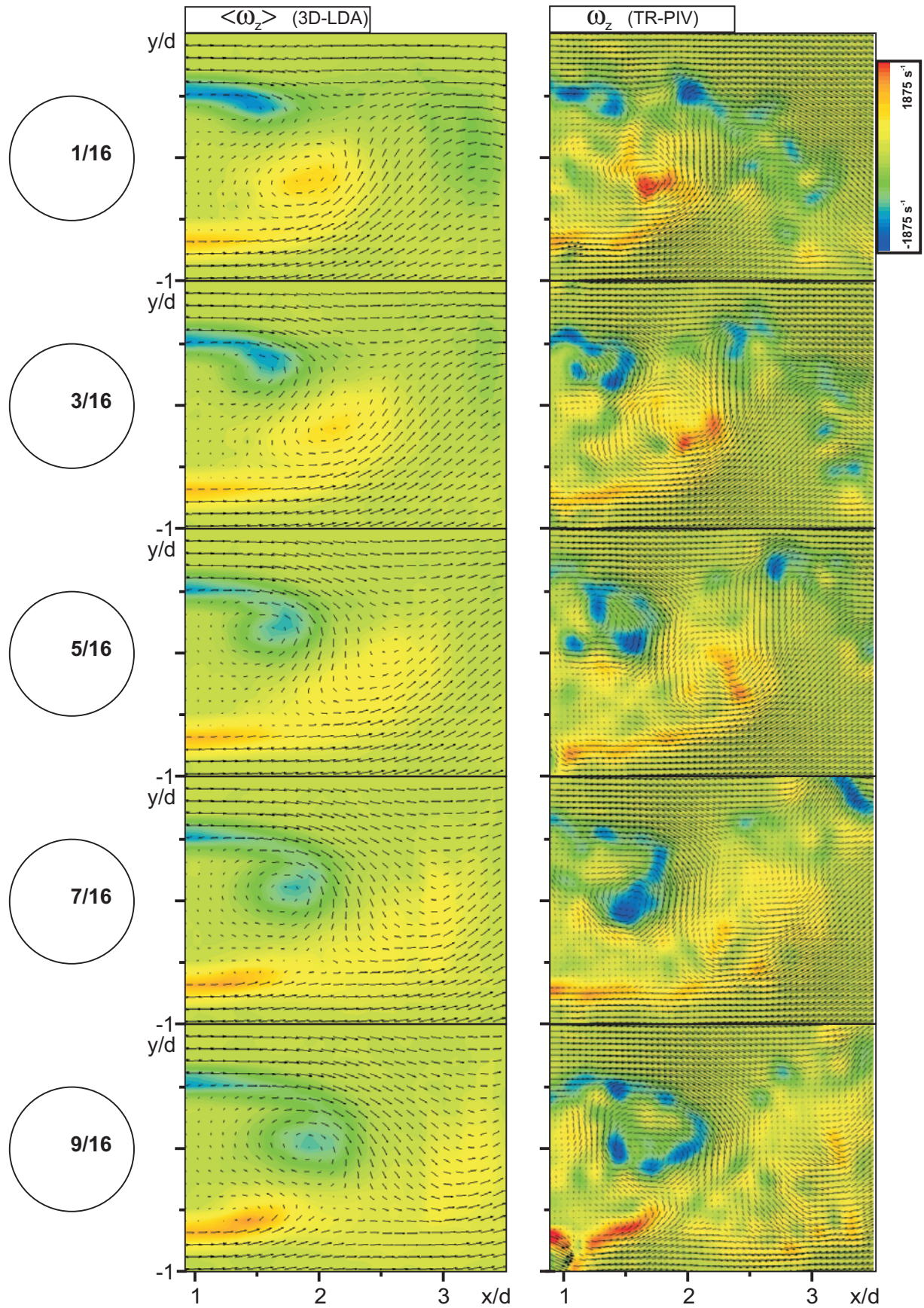


Abbildung 4: Geschwindigkeitsfelder und Wirbelstärkekomponente  $\omega_z$  im Zylindernachlauf bei  $Re = 5.000$ , links phasengemittelte LDA-Messungen, rechts TR-PIV Einzelbildsequenz, 250Hz

Zwei Messverfahren in verschiedenen Einsatzweisen kamen dabei zur Anwendung. Zum einen die 3D-LDA-Technik, die phasen- und ereignisgetriggert verwendet wurde, als auch ein TR-PIV-System mit 250 Hz Doppelbildrate.

Mit Hilfe der phasengemittelten 3D-LDA-Messung ist es möglich, neben dem Geschwindigkeitsfeld und der Wirbelstärke auch die Komponenten des Reynoldsschen Spannungstensors zu bestimmen. Zusätzlich können mehrere Terme der Bilanzgleichung der turbulenten kinetischen Energie berechnet werden. In der Darstellung der Turbulenzproduktion zeigt sich ein Anstieg in den instabilen Bereichen der abgelösten Scherschicht. Aussagen über die Struktur der instabilen Scherschicht erlaubt erst die ereignisgetriggerte 3D-LDA-Messung, die für das Ensemble der als instabile ermittelten Scherschichten eine Mittelung der Geschwindigkeitsmessungen ermöglicht.

Mit Hilfe der TR-PIV Technik ist es jetzt möglich, zusätzlich zu den bisherigen, in gemittelte Ergebnisse einfließende LDA Messungen, das momentane Geschwindigkeitsfeld zeitaufgelöst in einer Messfeldsequenz zu erfassen. Nun sind dabei statistische Aussagen wegen der im Vergleich zu LDA-Messungen niedrigen zeitlichen Auflösung noch nicht möglich, die Analyse einzelner TR-PIV-Sequenz zeigt aber die Abweichung des momentanen Geschwindigkeitsfelds vom phasengemittelten, mit LDA bestimmten Feld. Während die Grobstruktur sehr gut übereinstimmt, ist jetzt die kleinskalige Wirbelstruktur aus der Scherschichtinstabilität mit TR-PIV gut aufzulösen. Die periodischen Wirbel aus der Scherschicht werden auf den Primärwirbel aufgerollt und tragen zum Zerfall des kombinierten Systems wenige Zylinderdurchmesser stromab bei. Der quantitative Beitrag zur Turbulenzentwicklung hingegen kann nach der Identifikation des Mechanismus in den TR-PIV Sequenzen mit Hilfe der phasen- und ereignisgetriggerten 3D-LDA Technik aus den Größen der Bilanzgleichung der turbulenten kinetischen Energie, der Konvektion, der Turbulenzproduktion und der viskosen Diffusion, ermittelt werden

## Dank

Die Autoren danken der Firma Dantec Dynamics für die leihweise Bereitstellung des TR-PIV-Systems, insbesondere Herrn Dr. Westergaard für die Unterstützung der Versuchsdurchführung mit TR-PIV.

## Literatur

- [1] Brede M. und Leder A. 2001: On the structure of turbulence in the transitional cylinder wake, in: *New Results in Numerical and Experimental Fluid Mechanics III, Notes Numer. Fluid Mech. 77*, Springer, Berlin
- [2] Brede M. 2003: Measurement of the turbulence production in the cylinder separated shear-layer with event-triggered Laser-Doppler anemometry. Zur Veröffentlichung eingereicht bei *Exp. in Fluids*
- [3] Leder A. and Geropp D. 1988: Phase-averaged LDA measurements in turbulent separated flows; in: Durão, D.F.G. (Editor): *Proceedings of the fourth International Symposium on Applications of Laser-Anemometry to Fluid Mechanics*, Lissabon, Portugal, paper 3.3
- [4] Westergaard C. 2002: Possibilities in Time Resolved PIV, *Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik*, 10. Fachtagung der GALA e.V. 2002, Universität Rostock, p 2.1