

TOMOGRAPHISCHE UND ZEITAUFGELÖSTE PIV MESSUNGEN AN EINEM UMSTRÖMTEN ZYLINDERSTUMPF

Christian J. Kähler, Rainer Hain

Institute für Strömungsmechanik, TU Braunschweig, Bienroder Weg 3, 38106 Braunschweig

Zusammenfassung

Tomographische und zeitaufgelöste PIV Messungen wurden an einem endlichen Zylinder durchgeführt, mit dem Ziel die Topologie der Umströmung im Kopfbereich und die dynamischen Strömungsphänomene in der Scherschicht zu ermitteln. Die Ergebnisse zeigen, dass die eingesetzten Techniken wesentlich zum Verständnis der betrachteten Strömungsphänomene beitragen können. Neben der 3D Topologie der Ablöseregion und den Wirbelstrukturen, die auf der Oberseite des Zylinders beginnen und bis in den Nachlauf reichen, konnten insbesondere die dominanten Frequenzen und die dazugehörigen Amplituden der Scherschichtinstabilität innerhalb des betrachteten Strömungsfeldes orts aufgelöst ermittelt werden. Außerdem konnte eine niederfrequente Oszillation des Ablösegebietes nachgewiesen werden, die auch auf Flügelprofilen bei hinreichend kleinen Reynoldszahlen beobachtet wurden.

Einleitung

Die Umströmung von endlichen Zylindern mit einem kleinen Verhältnis von Länge zu Durchmesser l/d werden seit mehreren Jahren experimentell erforscht. Neben klassischen Visualisierungs-, Druck- und LDA-Messtechniken wurden auch die konventionelle und zeitaufgelöste Particle Image Velocimetry (PIV) eingesetzt, um die komplexen Strömungsverhältnisse und die dominanten Frequenzen im Nachlauf zu bestimmen, Pattenden et al. 2005, Roh und Park 2003, Leder 2003. Die folgende Abbildung zeigt schematisch die Strömungstopologie nach Pattenden et al. 2005 für einen Zylinder mit $l/d = 2$. Die Umströmung des Zylinderkopfes wurde bislang weniger detailliert untersucht, da die Strömungsstrukturen nicht so ausgeprägt und die dominanten Frequenzen deutlich schwieriger zu bestimmen sind als die großen Ablösewirbel im Nachlauf des Zylinders. Im Folgenden soll dieser Strömungsbereich mit der von Elsinger et al. 2006 entwickelten tomographischen Particle Image Velocimetry und der zeitaufgelösten PIV untersucht werden.

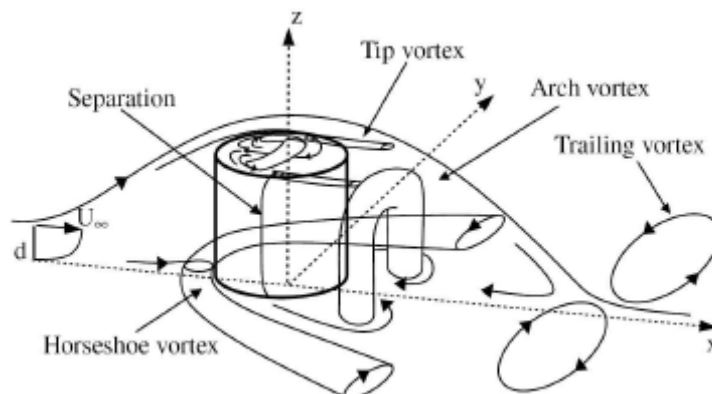


Abb. 1: Topologie der Umströmung eines Zylinderstumpfes nach Pattenden et al. 2005.

20.2

Experimenteller Aufbau

Die Experimente wurden im Wasserkanal des Instituts für Strömungsmechanik durchgeführt. Die Versuchsanlage hat eine 1250 mm lange, 250 mm breite und 330 mm hohe geschlossene Messstrecke mit optischen Zugangsmöglichkeiten von unten und von einer Seite und ein Kontraktionsverhältnis von 4. Die maximale Strömungsgeschwindigkeit ist 2 m/s und der Turbulenzgrad beträgt bei 0,33 m/s 0,28 % im Frequenzbereich 0,1-2000 Hz. Die Strömung wurde für die PIV Messungen mit 10 μm großen Glashohlkugeln versehen.

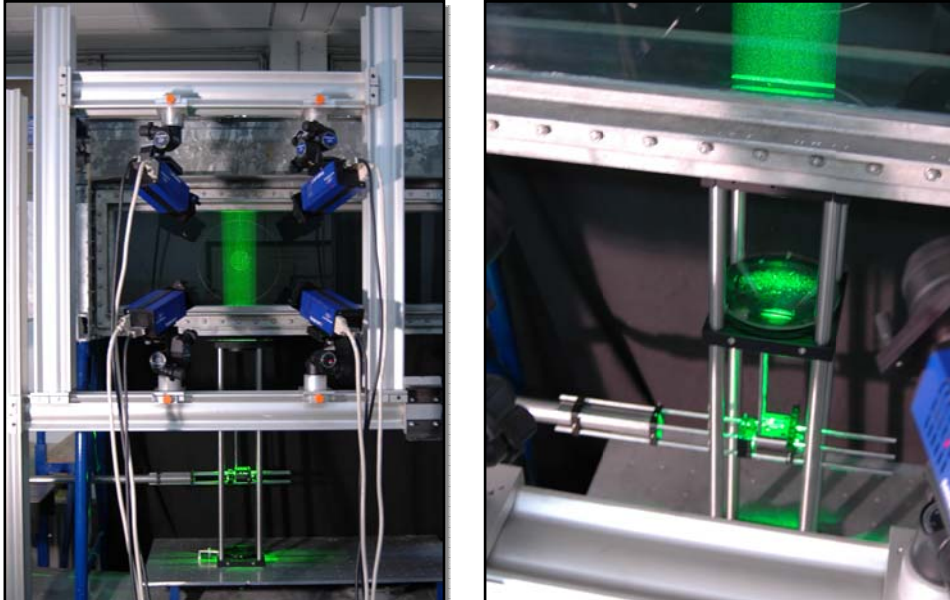


Abb. 2: Experimenteller Aufbau (links) und Strahlaufweitung (rechts).

An der Seitenwand der Messstrecke wurde ein transparenter Zylinder aus Plexiglas mit einem Durchmesser von $d = 60 \text{ mm}$ und einer Länge von $l = 130 \text{ mm}$ montiert. Gemäß Abb. 2 (links) wurde der Kopfbereich des Zylinders mit einem kollimierten Lichtschnitt beleuchtet, der 20 mm dick und 100 mm breit war. Zur Kollimierung wurde eine Linse mit 300 mm Brennweite und einem freien Durchmesser von 120 mm verwendet, die in der rechten Abbildung zu erkennen ist. Zusätzlich befand sich eine Blende unmittelbar unterhalb der Messstrecke, um die schwächeren Randstrahlen des Lasers wegzufiltern. Zur Verbesserung der Beleuchtungsintensität innerhalb des Messvolumens wurde der Lichtschnitt mit Hilfe eines Spiegels am oberen Rand der Messstrecke zurückreflektiert. Mit einem 150 mJ Doppelpuls-Laser konnten so trotz der geschlossenen Blende der Objektive über das gesamte beleuchtete Volumen fokussierte Partikelbilder beobachtet werden. Die Partikelbilder wurden mit vier CCD Kameras simultan aufgenommen, die ebenfalls in Abb. 2 (links) zu erkennen sind. In einer ersten Versuchsreihe wurden vier LaVision Imager pro X 4M Kameras mit 2.0k x 2.0k Pixel Auflösung bei einem Abbildungsmaßstab von 0.2 eingesetzt. Anschließend wurden weitere Messungen mit vier LaVision Imager pro X 11M Kameras mit einer Auflösung von 4.0k x 2.8k Pixel bei einem Abbildungsmaßstab von 0,45 durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen werden in Hain et al. 2007 diskutiert. Für die zeitaufgelösten PIV Messungen wurde die Symmetrieebene auf dem Zylinderkopf beleuchtet, mit dem Ziel die Scherschicht oberhalb des Ablösegebietes messtechnisch zu erfassen. Die Beleuchtung wurde mit einem von der Universität Rostock im Rahmen des DFG Schwerpunktprogramms 1147 beschafften Lasers der Firma Lee (LDP-200MQG) realisiert und für die Registrierung der Partikelbilder standen zwei Redlake HG-100K Kameras mit einer Auflösung von 1504 x 1128 Pixel bei einer Bildrate von 1kHz zur Verfügung, siehe Hain et al. 2007, die ebenfalls durch die DFG finanziert wurden.

Ergebnisse

Die folgenden Ergebnisse sind in dimensionsloser Form dargestellt, wobei in Anlehnung an die Literatur der Durchmesser des Zylinders und die Anströmgeschwindigkeit als Bezugsgrößen gewählt wurden. Die Reynoldszahl betrug rund 1×10^5 für alle Experimente. Abb. 3 zeigt beispielhaft die Topologie der Zylinderumströmung in Kopfbereich. Der Strömungsausschnitt ist $80 \times 80 \times 10 \text{ mm}^3$ und die Anzahl der Vektoren beträgt $117 \times 114 \times 16$ in den drei Raumrichtungen. Aufgrund der hohen Datendichte (über 200000 Vektoren) sind in Abb. 3

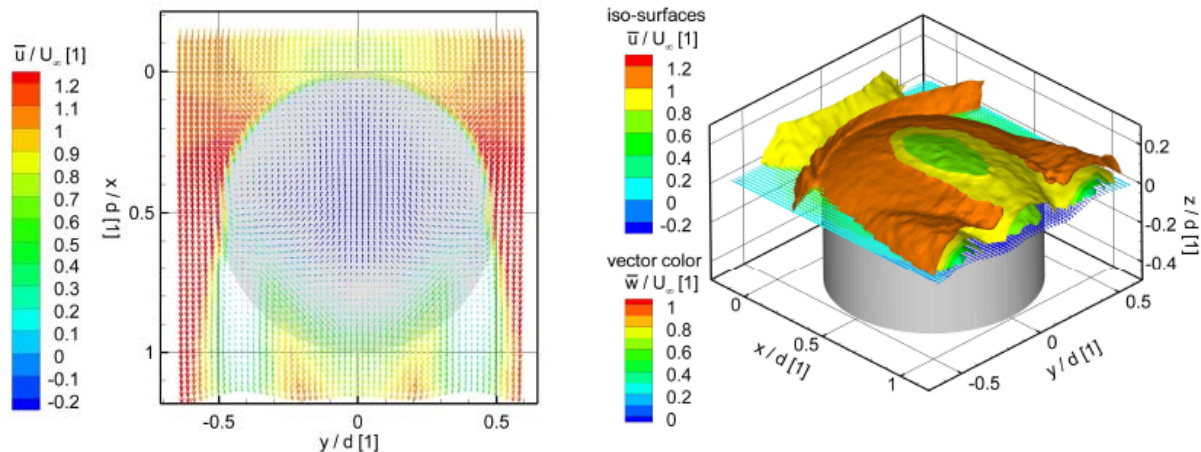


Abb. 3: Geschwindigkeitsverteilung in unmittelbarer Wandnähe (links) und Topologie der Zylinderumströmung im Kopfbereich (rechts).

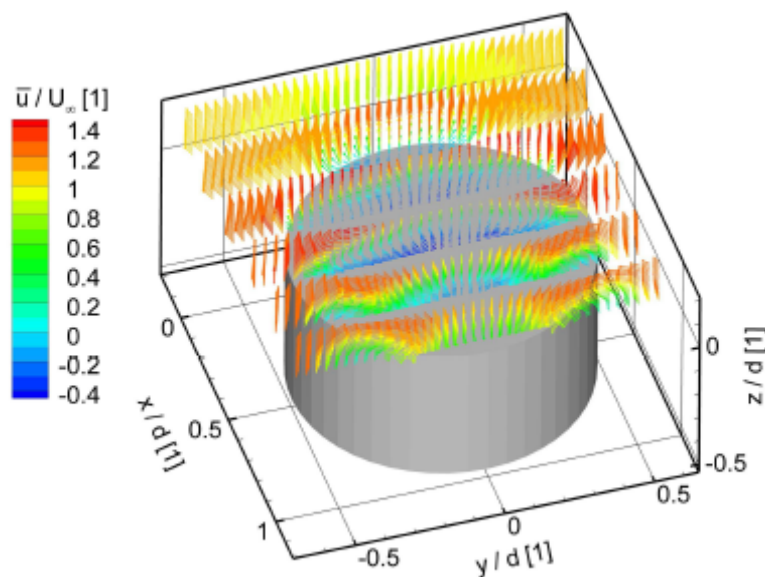


Abb. 4: Mittlere Geschwindigkeitsfelder extrahiert von dem tomographischen Datensatz.

(links) lediglich die mittleren Geschwindigkeitsvektoren in der wandnächsten Ebene dargestellt. Deutlich zu erkennen ist das Rezirkulationsgebiet (Vektorrichtung von unten nach oben) und die Position der Fokuspunkte bei $x/d=0.4$; $y/d= \pm 0.43$. An den Positionen $x/d=0.8$; $y/d= \pm 0.4$ befinden sich die Zentren der beiden Kopfwirbel, die bis in den Nachlauf hinein reichen, wie in der rechten Abbildung deutlich zu erkennen ist. Die Konturen kennzeichnen Ebenen in denen die Geschwindigkeit in Hauptströmungsrichtung gleich ist. Die zeitlich über 50 unabhängige Geschwindigkeitsfelder gemittelte Topologie ist qualitativ ähnlich mit Abb. 1.

20.4

Bei genauer Betrachtung sind jedoch einige Unterschiede erkennbar. Neben der Position der Wirbelzentren und der Größe des Ablösegebietes fällt insbesondere auf, dass der Bereich zwischen den Ablösewirbeln in der Skizze nicht berücksichtigt wurde. In Abb. 4 ist zu erkennen, dass es sich wirklich um Wirbel handelt die im Nachlauf abschwimmen. Für weitere Informationen siehe Hain et al. 2007.

Um die instationären Strömungseffekte zu untersuchen, wurden zeitaufgelöste PIV Messungen auf dem Zylinderkopf durchgeführt. Im Gegensatz zu den tomographischen PIV Experimenten war der Zylinder in diesem Experiment 60 mm dick und 120 mm lang. Mit einer Bildrate von 2000 Hz wurden bei einer Auflösung von 1504 x 544 Pixel über 2,62 Sekunden Doppelbilder aufgenommen. Der Pulsabstand betrug 100 μ s. Die Auswertung der Messungen wurde iterativ mit der DaVis 7.1 Software von LaVision durchgeführt. Die Größe der Auswertefenster war 16 x 16 Pixel und der Abstand zwischen den Vektoren betrug 8 Pixel. In Abb. 5 ist das mittlere Strömungsfeld (oben) und die primären Reynoldsschen Schubspannungen (unten) dargestellt. Im oberen Bild ist das Rückströmgebiet und auch das Wideranlegen im hinteren Bereich des Zylinders deutlich zu erkennen. Das Anlegen ist eine Folge des laminar turbulenten Umschlags in der Scherschicht aufgrund der Scherschicht- oder Kelvin-Helmholtz-Instabilität.

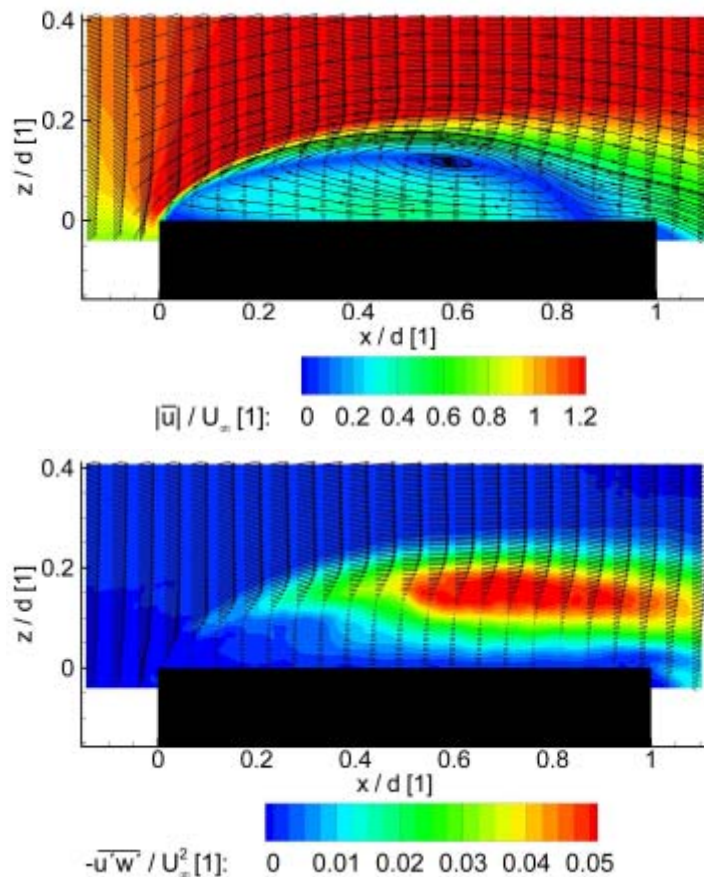


Abb. 5: Mittleres Strömungsfeld (oben) und Reynoldssche Schubspannungen (unten).

Um die dominante Frequenz f der instabilen Scherschicht oberhalb des Ablösegebietes auf dem Zylinderkopf zu bestimmen, wurde mit der Fourieranalyse die Strouhalzahl $Sr = fd/U$ bestimmt. In Abb. 6 ist die dominante Strouhalzahl für die Geschwindigkeitsfluktuationen in Hauptströmungsrichtung u' (oben) und normal zur Zylinderoberfläche w' (unten) dargestellt. Farblich kodiert ist die dimensionslose Frequenz und die Höhendarstellung verdeutlicht quantitativ die Amplitude der jeweiligen Frequenz. In der unteren Abbildung ist zu erkennen, dass die maximalen Amplituden im Bereich der Scherschicht auftreten. Ferner ist schön zu

beobachten, dass die dominanten Frequenzen mit zunehmender Entfernung von der Zylindervorderkante leicht abnehmen. Die relativ geringe Frequenz von $St=0,05$ in der oberen Abbildung, die sich über das gesamte Ablösegebiet erstreckt, hat nichts mit der Scherschichtinstabilität zu tun. Diese Frequenz zeigt, dass das Ablösegebiet offenbar nicht stationär ist, sondern geringfügig oszilliert. Diese Oszillation ist in der Profilaerodynamik unter dem Namen *Flapping* bekannt und wurde intensiv untersucht.

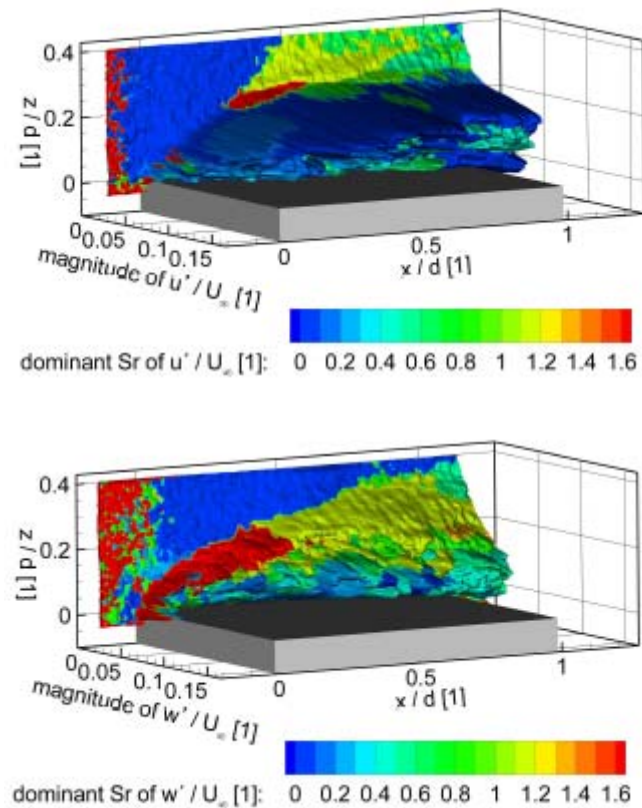


Abb. 6: Dominante Strouhalzahl für die Geschwindigkeitsfluktuationen in Hauptströmungsrichtung u' (oben) und normal zur Zylinderoberfläche w' (unten)

Zusammenfassung

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen zeigen die Leistungsfähigkeit moderner PIV Techniken und geben einen Eindruck von den vielfältigen Möglichkeiten bei der Analyse der Daten. Mit der tomographischen PIV Methode konnte die 3D Topologie der Zylinderumströmung im Kopfbereich aufgeklärt werden und mit Hilfe der zeitaufgelösten PIV Technik wurden die dominanten Frequenzen der Scherschichtinstabilitäten und deren Amplituden bestimmt. Die Untersuchungen zeigen, dass neben der Kelvin-Helmholtzinstabilität auch ein niederfrequentes Flapping der Ablösung auftritt, ähnlich wie bei laminaren Ablöseblasen auf Profilen bei kleinen Reynoldszahlen.

Dankesworte

Die Autoren danken Dirk Michaelis von der Firma LaVision für die Unterstützung bei den tomographischen PIV Messungen und der Auswertung der Daten und der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) sei an dieser Stelle gedankt für die finanzielle Unterstützung im Rahmen des Schwerpunktprogramms SPP 1147 *Bildgebende Messverfahren für die Strömungsanalyse*.

20.6

Literatur

Pattenden RJ, Turnock SR and Zhang X: Measurements of the flow over a low-aspect-ratio cylinder mounted on a ground plane. *Exp. Fluids*, 39, pp. 10-21, 2005

Roh SC and Park SO: Vortical flow over the free end surface of a finite circular cylinder mounted on a flat plate. *Exp. Fluids* 34, pp. 63-67, 2003

Leder A: 3D-flow structures behind truncated circular cylinders, Proc. of the 4th ASME-USME Joint Fluideng. Conf. Honolulu, Hawaii, USA, July 2003

Elsinga GE, Scarano F, Wieneke B and Oudheusden BW van: Tomographic particle image velocimetry. *Exp. Fluids*, 41, pp. 933-947, 2006

Hain R, Kähler CJ, Michaelis D: Tomographic and time resolved PIV measurements on a finite cylinder mounted on a flat plate. 7th International Symposium on PIV, Rom, Italy, Sept. 11-14 2007

Hain R, Kähler CJ and Tropea C: Comparison of CCD, CMOS and intensified cameras. *Exp. Fluids*, 42, pp. 403-411, 2007