

# ANWENDUNGEN DER PIV-MESSTECHNIK IM TAYLOR-COUETTE-SYSTEM MIT NEWTONSCHEN UND NICHTNEWTONSCHEN FLUIDEN

**M. Smieszek, C. Egbers**

Lehrstuhl für Aerodynamik und Strömungslehre (LAS),

Brandenburgische Technische Universität Cottbus, Siemens-Halske-Ring 14, 03044 Cottbus

E-Mail: smieszm@tu-cottbus.de

## Zusammenfassung

Nichtnewtonsche Fluide finden eine weite Anwendung in der Industrie. Es besteht ein erhebliches Interesse daran, das Strömungsverhalten dieser Stoffe zu analysieren und zu verstehen, um die Parameter zu bestimmen, bei denen die Strömung instabil wird. Aber auch wie Fluide effizient gemischt werden können oder wo Wärme- und Stofftransportprobleme durch sogenannte "Totzonen" auftreten können, sind Fragen in der Verfahrenstechnik. Die Geschwindigkeitsmessung in nichtnewtonschen Fluiden bietet sich dabei als direkte und effiziente Methode an.

In den hier vorgestellten Experimenten wird die Strukturbildung und Stabilität der Strömung Newton'scher und nichtnewtonscher Fluide im Taylor-Couette-System untersucht. Zur Durchführung der Geschwindigkeitsmessungen wird ein PIV-System mit einer monochromen CCD-Kamera eingesetzt. Die Auswertung der Daten zeigt, daß die Geschwindigkeitsfelder im Taylor-Couette-System auch bei hohen Reynoldszahlen mittels PIV hochauflösend gemessen werden können.

## 1 Einleitung

In der Industrie gibt es eine Vielzahl von Anwendungen nichtnewtonscher Fluide. Sie zeichnen sich durch komplexe Materialeigenschaften aus, zu deren Beschreibung eine Vielzahl von Modellen existieren. Eine Einführung hierzu findet man unter anderem in Bird et al. [1987] und Tanner [2000]. Hinsichtlich des Verständnisses und der Voraussage von Strömungen nichtnewtonscher Fluide, sind quantitative Strömungsmessungen ein wichtiges Hilfsmittel. Einen Überblick über experimentelle Methoden der Geschwindigkeitsmessung in nichtnewtonschen Fluiden findet man bei Muller [2002]. Pakdel und McKinley [1997] setzen die PIV-Meßtechnik zur Geschwindigkeitsmessung mit einem ideal elastischen Fluid und einer scherverdünnenden Lösung in unterschiedlichen Strömungsgeometrien ein.

Wir untersuchen die Strukturbildung und Stabilität der Strömung nichtnewtonscher Fluide in einem klassischen Taylor-Couette-System. Referenzmessungen werden mit einem Newton'schen Fluid durchgeführt. Zur quantitativen Analyse der auftretenden Strömungen werden PIV-Messungen gemacht. Damit ist die Beschreibung von Strömungszuständen und der Vergleich von Untersuchungen mit Newton'schen Fluiden möglich.

Im Folgenden werden der experimentelle Aufbau, die verwendete Meßtechnik und schließlich Ergebnisse der Untersuchungen vorgestellt.

## 2 Experimenteller Aufbau

### Taylor-Couette-System

In Abbildung 1 ist das in den Untersuchungen verwendete Taylor-Couette-System dargestellt. In diesem Abschnitt werden nur die wichtigen Merkmale des experimentellen Aufbaus erläutert. Eine detaillierte Beschreibung der Anlage findet man bei Meincke et al. [2000].

Bei den Untersuchungen zur Strukturbildung und Stabilität werden symmetrische Randbedingungen vorgegeben, die Endplatten des Systems sind fixiert. Der innere Zylinder wird rotiert, der äußere ist fest. Um eine konstante Temperatur im Fluid zu gewährleisten, ist der Untersuchungsaufbau in einer Plexiglasbox eingehaust, durch die kontinuierlich destilliertes Wasser mit einer Temperatur von  $25 \pm 0.1^\circ\text{C}$  zirkuliert.

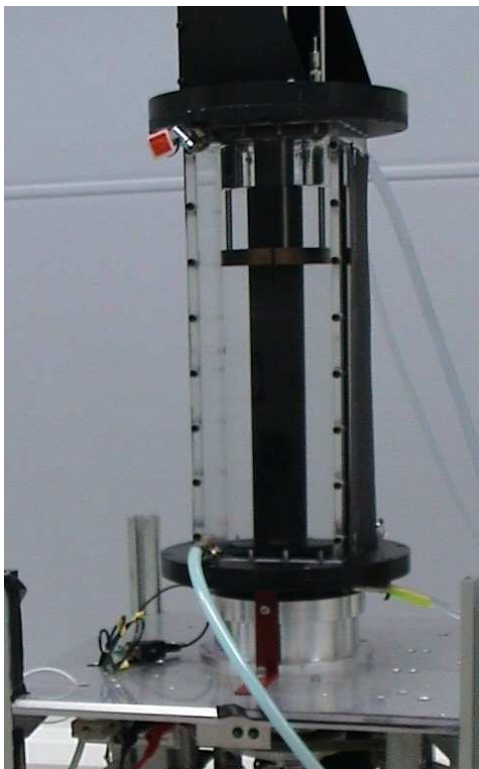


Figure 1: Fotografie des Taylor-Couette-Systems.

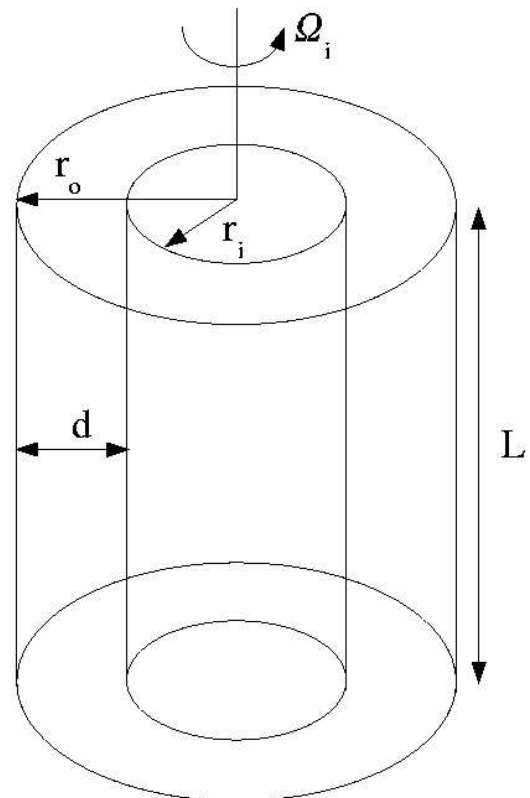


Figure 2: Schematische Darstellung des Taylor-Couette-Systems mit den geometrischen Parametern.

Die Geometrie wird festgelegt durch den Radius  $r_i$  des Innenzylinders, den Radius des Außenzylinders  $r_a$  und die Länge  $L$  des Untersuchungsbereiches (Abb. 2). Das System hat ein festes Radienverhältnis  $\eta = r_i/r_a = 0.5$ . In den Experimenten sind das Aspektverhältnis  $\Gamma$  und die Reynoldszahl  $Re$  zwei wichtige Kontrollparameter. Das Aspektverhältnis  $\Gamma$  ist definiert als

$$\Gamma = \frac{L}{d} \quad (1)$$

wobei  $d = r_a - r_i$  die Spaltweite zwischen den Zylindern ist. Die Reynoldszahl ist definiert als

$$Re = \frac{\Omega_i r_i d}{\nu} \quad (2)$$

wobei  $\nu$  die kinematische Viskosität des Fluids ist.  $\Omega_i$  ist die Winkelgeschwindigkeit des Innenzylinders.

Die Messungen werden bei verschiedenen kleinen und mittleren Aspektverhältnissen zwischen 4 und 10 durchgeführt.

Zur Visualisierung der Strömungsstrukturen im Taylor-Couette-System werden dem Fluid Aluminiumpartikel mit einem Durchmesser von  $70\mu\text{m}$  als Tracer zugegeben. Das Strömungsverhalten wird mit einer Videokamera aufgezeichnet. Quantitative Messungen des Geschwindigkeitsfeldes im Zylinderspalt werden mittels PIV durchgeführt. Ergänzend dazu wird der mit Hilfe einer Laserdiode ein Lichtschnitt im Zylinderspalt erzeugt, der mit einer digitalen Spiegelreflexkamera dokumentiert, so daß ein Vergleich von PIV- und Fotoaufnahmen möglich ist.

## Fluide

Als Newton'sches Fluid wird Silikonöl M3 (Baysilone M3, GE Bayer Silicones Deutschland) verwendet. Für die Untersuchungen mit dem nichtnewtonschen Fluid wird eine Polymerlösung aus der Gruppe der Bogerfluide verwendet. Bogerfluide bestehen aus einem hochviskosen Newton'schen Löser und einem Polymer.

Analog zu Groisman und Steinberg [1998] wird ein hochviskoser Newton'scher Löser aus 65 % Saccharose und 1 % Natriumchlorid in Reinstwasser verwendet. Zusätzlich werden 1 ‰ Formalin als Stabilisator zugefügt. Als Polymer wird Polyacrylamid (Polysciences) mit einem Molekulargewicht  $M_W = 1.8 \cdot 10^7$  verwendet.

## PIV-Meßtechnik

Für die Bestimmung des Geschwindigkeitsfeldes im Taylor-Couette-System wird ein PIV-Meßsystem der Firma TSI verwendet. Die monochrome CCD-Kamera hat eine Auflösung von  $1024 \times 1000$  Pixel. Es wird ein Lichtschnitt mit einem Nd:YAG Laser (15mJ, Wellenlänge 532nm) und einem Linsensystem erzeugt, der koplanar mit den Zylinderachsen ausgerichtet ist. Als Tracer werden Polymerpartikel mit einem Durchmesser von 13 - 35  $\mu\text{m}$  eingesetzt. Die aufgenommenen Bilder werden mit einem 8-bit Videosignal an eine Framegrabber Karte in einem PC übertragen. Mit dem Programm INSIGHT werden die Bildinformationen ausgewertet.

## 3 Ergebnisse

In den Abbildungen 3 und 4 sind die Stabilitätsdiagramme für die beobachteten Strömungszustände aus Untersuchungen mit dem Newton'schem Fluid bei  $\Gamma = 4$  und  $\Gamma = 10$  dargestellt. Bei einer kleinen Reynoldszahl des Innenzylinders bildet sich zuerst die laminare Grundströmung (Couette-Strömung) aus. Sie existiert nur bis zu einer kritischen Reynoldszahl  $Re_c$ , bei der sich die Taylor-Wirbelströmung (TVF) ausbildet. Diese wird bei weiterer Erhöhung der Reynoldszahl instabil. Es treten oszillatorische Moden auf, bei der die Taylorwirbel wellenförmig, periodisch moduliert sind (WVF). Neben der gebrochenen Translationssymmetrie wird auch die kontinuierliche Rotationssymmetrie gebrochen (Gollub [1987]). Durch den Einfluß der Ränder wird der WVF in den

Randwirbeln gedämpft. Wird die Reynoldszahl erhöht, bildet sich der modulated Wavy Vortex Flow (mWVF) aus, der bei einer weiteren Erhöhung der Rotationsgeschwindigkeit in die turbulente Taylor-Wirbelströmung übergeht.

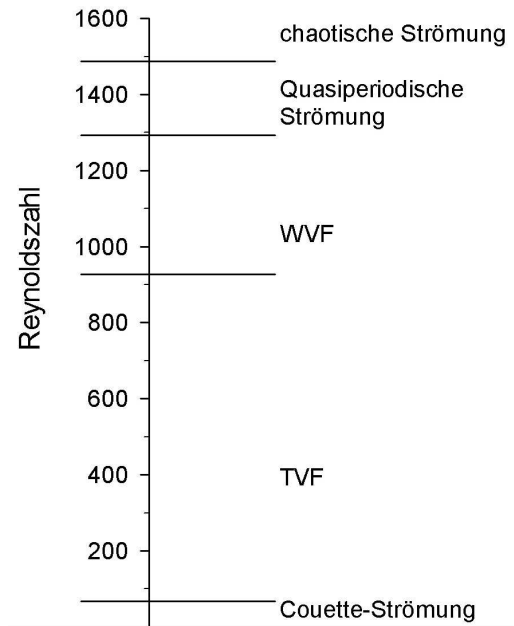


Figure 3: Stabilitätsdiagramm aus Untersuchungen mit dem Newton'schen Fluid als Funktion von Re bei  $\Gamma = 4$ .

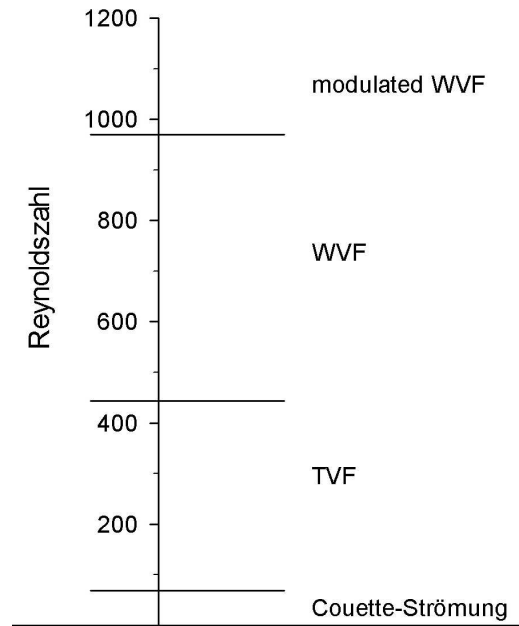
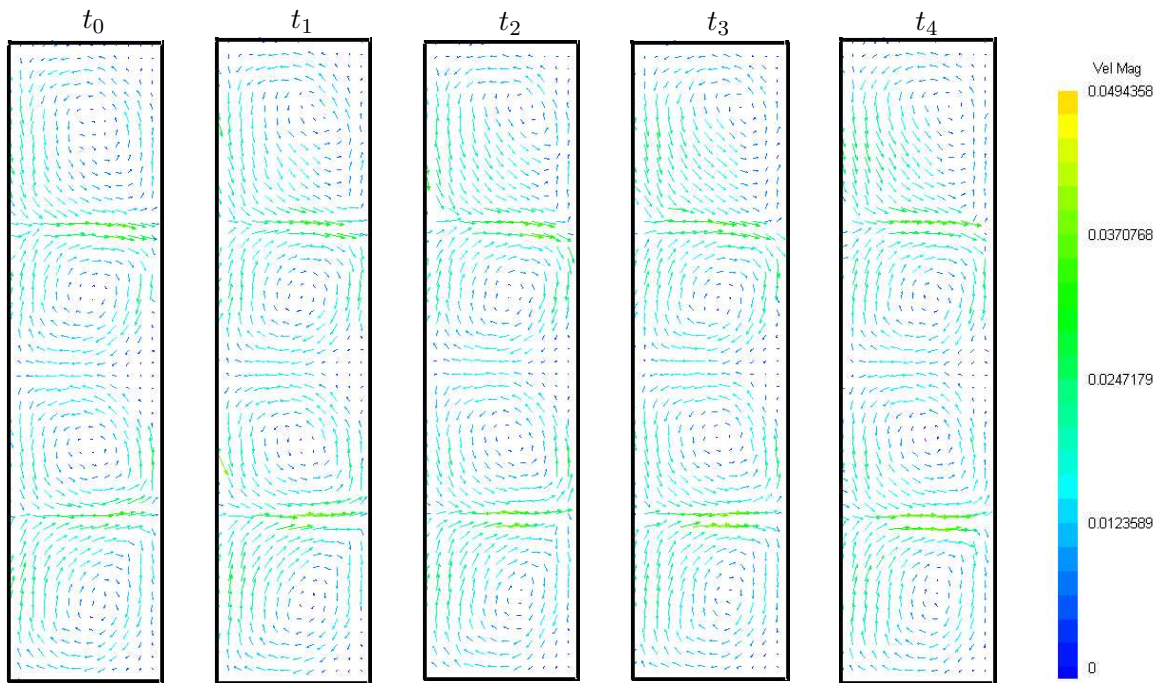
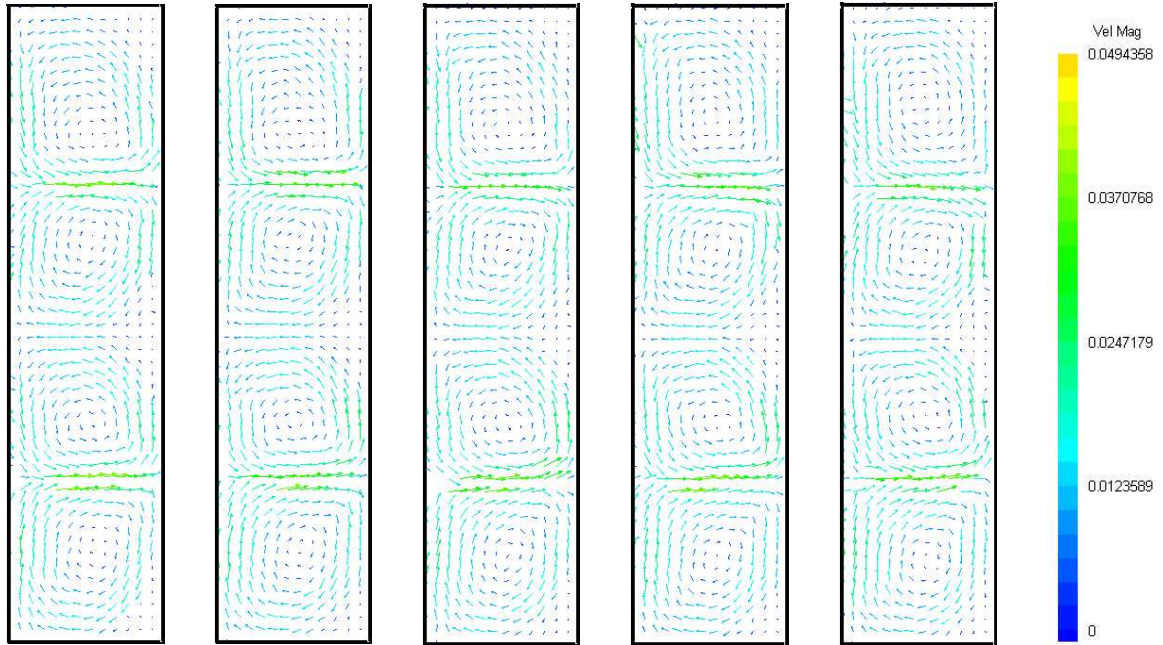


Figure 4: Stabilitätsdiagramm aus Untersuchungen mit dem Newton'schen Fluid als Funktion von Re bei  $\Gamma = 10$ .

Die Ergebnisse zeigen eine gute Übereinstimmung mit Untersuchungen in der Literatur (z.B. Meincke et al. [1999]).

In Abbildung 5 sind PIV-Aufnahmen der quasiperiodischen Strömung bei  $\Gamma = 4$  und  $Re = 1293$  dargestellt. Im Taylor-Couette-System sind vier Wirbel ausgebildet. Der zeitliche Abstand zwischen den Bildern beträgt  $\Delta t = 7\text{ms}$ . Dargestellt ist eine Periode. Zum Zeitpunkt  $t_1$  beginnt der Wirbelkern des obersten Wirbels (Wirbel 4) sich in den oberen Bereich des Wirbels zu verschieben. Zwischen  $t_8$  und  $t_9$  hat der Wirbelkern den höchsten Punkt erreicht. Die Bewegung kehrt sich ab  $t_{10}$  um, so daß zum Zeitpunkt  $t_{19}$  der Ausgangszustand wieder erreicht ist. Die Bewegung der Wirbelkerne der anderen Wirbel verläuft analog.



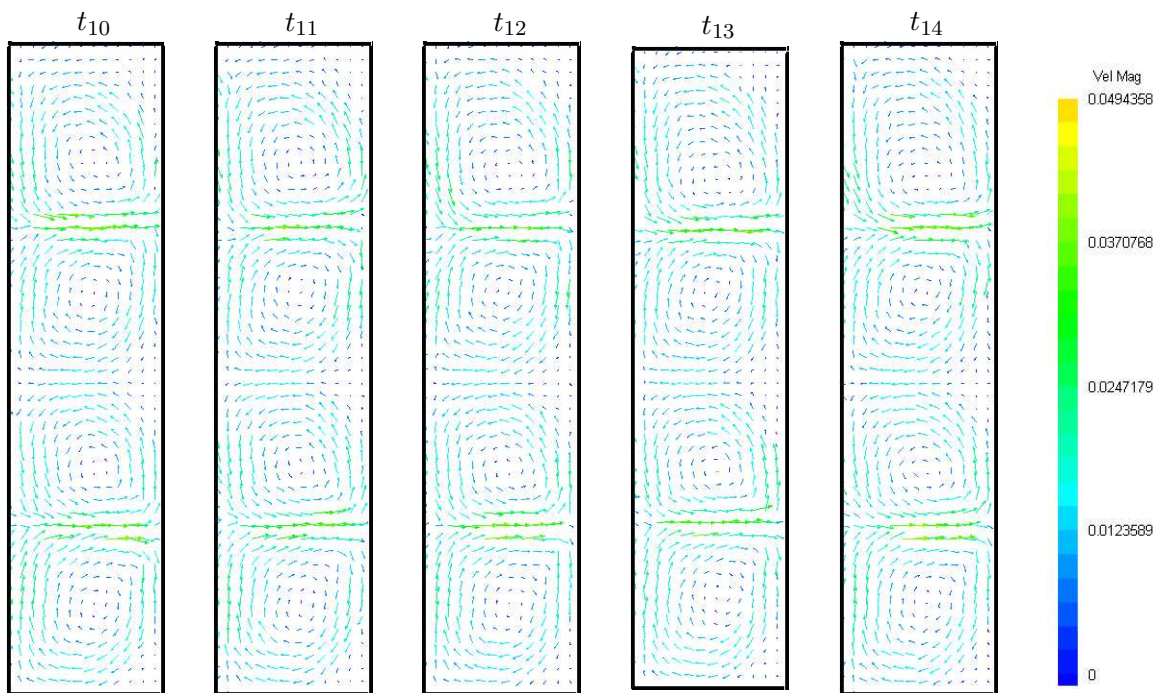
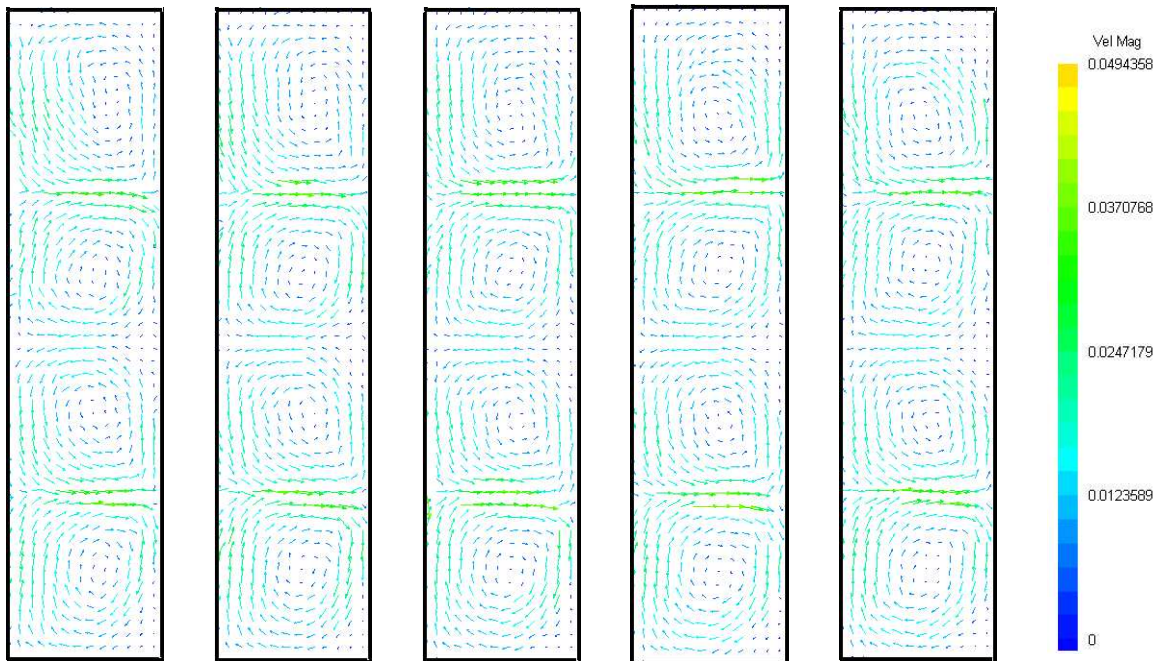
$t_5$

$t_6$

$t_7$

$t_8$

$t_9$



$t_{15}$   $t_{16}$   $t_{17}$   $t_{18}$   $t_{19}$

Figure 5: PIV-Aufnahmen für  $\Gamma = 4$  bei  $Re = 1293$ . Es sind 4 Wirbel ausgebildet. Die Aufnahmen der quasiperiodischen Strömung haben einen zeitlichen Abstand von  $\Delta t = 7\text{ms}$ . Der Innenzylinder befindet sich jeweils am linken Bildrand.

## 4 Ausblick

Die in den Untersuchungen mit dem Silikonöl als Newton'sches Fluid im Taylor-Couette-System erzielten Ergebnisse zeigen, daß mit der PIV-Meßtechnik auch bei sehr hohen Reynoldszahlen detaillierte Aussagen über die Strömung im System erstellt werden können. Als nächstes ist die Anwendung von PIV zur quantitativen Messung des Geschwindigkeitsfeldes im Taylor-Couette-System mit nichtnewtonschen Fluiden geplant. Von besonderem Interesse ist vor allem die durch nichtnewtonsche Fluide veränderte Dynamik gegenüber der Newton'schen Strömung und die damit verbundenen neuen Strömungszustände.

## Danksagung

Die Arbeit wird durch ein Promotionsstipendium der BTU Cottbus gefördert.

## Literatur

- Bird, R.B., Armstrong, R.C., Hassager, O., 1987 "Dynamics of polymeric liquids" John Wiley & Sons
- Golubitsky M., Stewart I., Schaeffer D.G., 1987 "Singularities and Groups in Bifurcation Theory" Applied mathematical science vol. 69, Springer, New York
- Groisman, A., Steinberg, V., 1998 "Mechanism of elastic instability in Couette flow of polymer solutions: Experiment." Phys. Fluids Vol. 10: pp. 2451–2463
- Meincke, O., Egbers, C., 1999 "Routes into Chaos in Small and Wide Gap Taylor-Couette Flow Phys. Chem. Earth (B) Vol. 24: pp. 467–471
- Meincke, O., Egbers, C. Scurtu, N., Bänsch, E., 2000 "Taylor-Couette system with asymmetric boundary conditions." Physics of Rotating Fluids (Lecture Notes in Physics, Vol. 549)
- Muller, S.J., 2002 "Velocity measurements in complex flows of non-Newtonian fluids" Korea-Australia Rheology Journal Vol. 14: pp. 93–105
- Pakdel, P., McKinley, G.H., 1997 "Digital Particle Imaging Velocimetry of Viscoelastic Fluids" AIChE Journal Vol. 43: pp. 289–302
- Tanner, R.I., 2000 "Engineering rheology" Oxford University Press