

## **EXPERIMENTELLE PIV-MESSUNG EINES UMSTRÖMTEN ZYLINDERS MIT ELASTISCHER STRUKTUR IM NACHLAUF**

### **EXPERIMENTAL PIV MEASUREMENT OF A CIRCULATED CYLINDER WITH AN ELASTIC STRUCTURE WITHIN THE WAKE**

**Philipp Mattern, Friedrich Fröhlig, Iris Pantle, Martin Gabi**

Karlsruhe Institut für Technologie (KIT), Fachgebiet Strömungsmaschinen

2D-3C Stereo-PIV, 2D-2C High Speed-PIV, Fluid-Struktur-Wechselwirkung  
2D-3C Stereo-PIV, 2D-2C High Speed-PIV, Fluid-Structure-Interaction

#### **Zusammenfassung**

Zum Zweck der Validierung zeitabhängiger, numerischer Simulationen zur Fluid-Struktur-Wechselwirkung wurden zeitlich und räumlich hochauflösende PIV-Messungen an einer instationären Strömung vorgenommen. Ein im Nachlauf eines Zylinders mit einem Durchmesser von 40mm mittig eingelassenes Plättchen der Länge 56mm wurde durch Umströmung zur Schwingung angeregt. Die Anströmmachzahl lag hierbei im Grenzbereich zur kompressiblen Strömung ( $Ma=0,1$ ). Diese Einschränkung trägt der Tatsache Rechnung, dass in diesem Bereich sowohl kompressible als auch inkompressible Simulationsverfahren zum Vergleich herangezogen werden können. Die Strömung im Bereich des Plättchens wurde zum einen mittels eines 2D-3C Stereo-PIV-Systems erfasst, zum anderen mittels eines 2D-2C High Speed PIV-Systems. Es entstanden umfassende Messungen statischer, wie dynamischer Natur. Alle Messreihen wurden hinsichtlich der Geschwindigkeiten ihrer Umströmung untersucht. Die Erfassung des ausgelenkten Plättchens in den stationären Stereoaufnahmen wurde durch eine Triggerschaltung ermöglicht. Im Bereich der High Speed Messung konnten durch die hohe Bildfrequenz von 10 kHz die dynamischen Messreihen per Postprocessing zusätzlich noch auf Schwingungen der Struktur untersucht werden. Die Ergebnisse können nun mit CFD- und Struktursimulationen verglichen werden.

#### **Einleitung**

Um es zu ermöglichen, das hauseigene CFD- Softwarepaket SPARC zu validieren, sollte ein einfaches Experiment entwickelt werden.

Der Aufbau wurde so gewählt, dass dessen Strömungsbild mittels des institutseigenen 2D-3C Particle-Imaging Velocimetry (PIV) Systems untersucht werden konnte. Das Experiment wies eine Periodizität auf, so dass mit Hilfe einer geeigneten Triggerung, die im Rahmen dieser Arbeit entwickelt wurde, definierte Zustände innerhalb der Periodizität aufgenommen werden konnten. Am geeignetsten erscheint eine Anordnung, bei der eine elastische Struktur in einer periodischen Wirbelstrasse schwingt.

Als zweiter Schritt wurde das Experiment mit einem neuen 2D-2C High Speed PIV- Systems untersucht.

## Versuchsaufbau

Im Rahmen der Untersuchungen wurden Messungen sowohl als quasistationäre Stereo-PIV (2D-3C) als auch als zeitabhängige High Speed PIV (2D-2C) durchgeführt.

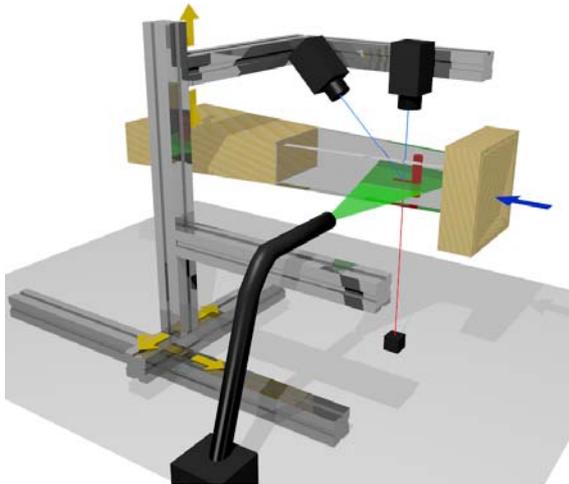


Abb. 1: Versuchsaufbau Stereo-PIV

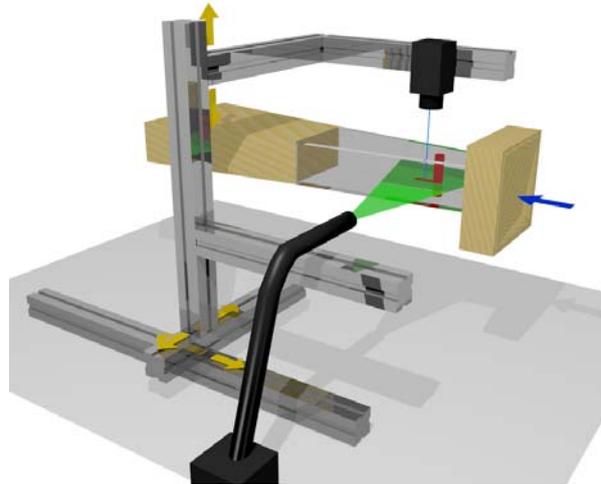


Abb. 2: Versuchsaufbau High Speed PIV

Abb. 1 zeigt den Aufbau für die Stereo-PIV Messungen. Der Kanal saugt die Luft aus der Umgebung an (Pfeil rechts). Dies ist sowohl vorteilhaft für den Turbulenzgrad der Anströmung als auch für die Einbringung des Seedings sowie die Volumenstrommessung. Hinter dem Kanaleingang ist der Zylinder mit dem eingelassenen Plättchen befestigt. Über zwei Lichtschranken die unter dem Kanal befestigt sind, wird die Messung in Abhängigkeit der Plättchenposition und Bewegungsrichtung getriggert. Der Lichtschnitt befindet sich parallel zu Unterseite des Kanals in der Mitte des Plättchens und damit auch parallel zur Schwingungsebene des Plättchens. Die Kameras und die Lichtschnittoptik sind auf einer 3D-Traversierung montiert und können als Gesamtsystem beliebig verfahren werden. Es wurde hier ein asymmetrischer Kameraaufbau gewählt, sodass eine Kamera senkrecht zum Lichtschnitt und die zweite im Winkel von  $37,5^\circ$  dazu ausgerichtet ist.

In Abb. 2 ist der Aufbau für die High Speed PIV Messungen skizziert. Er entspricht im Wesentlichen dem Aufbau in Abb. 1, allerdings ohne zweite Kamera, Lichtschranken und Triggerschaltung.

## Technische Ausstattung

Für die Stereo-PIV Messungen wurden zwei PCO Sensicam QE Kameras und ein Quantel Twins BSL140 Laser, für die High Speed Messungen eine Photron SA3 Kamera und ein Quantronix Darwin-Duo 100 Laser benutzt. Beide Systeme wurden über einen ILA Net-Synchronizer gesteuert. Um für die Stereo-PIV-Messung immer die gleiche Plättchenposition und Bewegungsrichtung zu gewährleisten, wurde eine Triggerschaltung entworfen. Diese basiert auf zwei fokussierten Laserlichtschranken, die die Messung über eine nachgeschaltete Logik bei gewünschter Plättchenposition und Bewegungsrichtung durch einen TTL-Impuls im Synchronizer auslösen. Die Lichtschranken arbeiten mit einer Frequenz von 2 kHz und lösen damit die Schwingung ausreichend detailliert auf. Die Logik operiert im Nanosekundenbereich und kann als verzögerungsfrei betrachtet werden. Abb. 3 zeigt eine Prinzipskizze der verwendeten Triggerschaltung.

Der Volumenstrom wurde über den Differenzdruck zwischen Einströmdüse und Umgebungsdruck bestimmt. Sämtliche Drücke wurden durch Betz-Manometer bestimmt.

Als Seeding dienten Olivenölpartikel von ca.  $1 \mu\text{m}$  Größe. Die Lichtschnittdicke betrug in beiden Fällen ca. 1 mm.

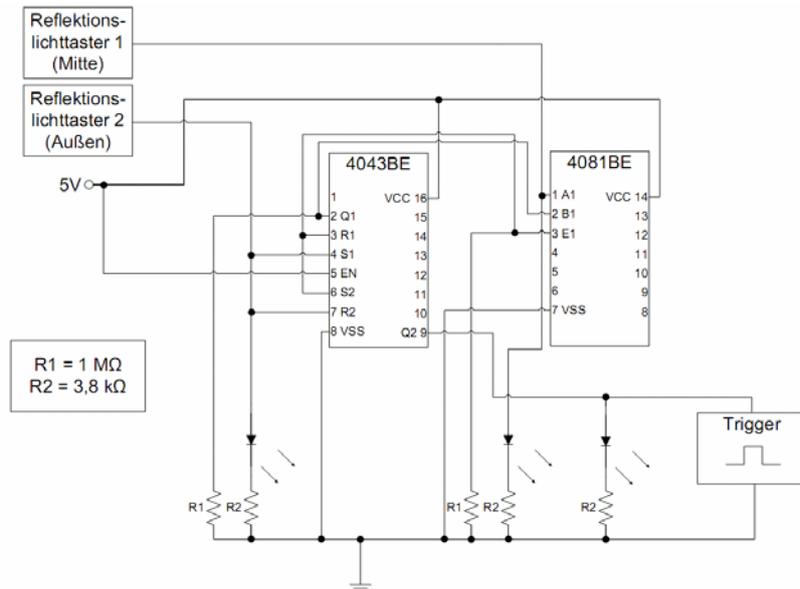


Abb. 3: Prinzipskizze der verwendeten Triggerschaltung

## Durchführung

Die Messstrecke wurde saugseitig an einem Ventilatorversuchsstand betrieben und von dessen Festkörperschwingungen entkoppelt.

Zuerst wurde die Anströmung mittels einer gesonderten Stereo-PIV Messung im Eintrittsquerschnitt kontrolliert.

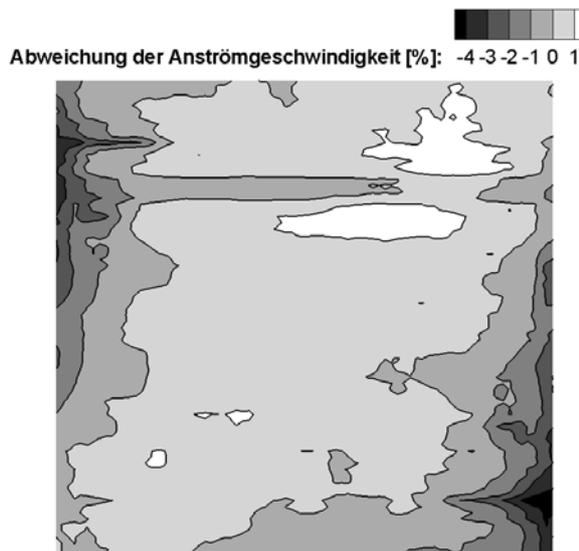


Abb. 4: Abweichung von der durchschnittlichen Anströmgeschwindigkeit in [%]

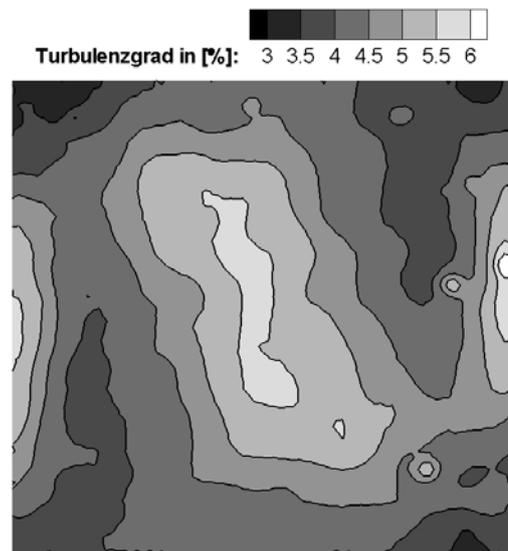


Abb. 5: Turbulenzgrad in [%]

Abb. 4 zeigt ein recht gleichförmiges Geschwindigkeitsprofil über dem Eintrittsquerschnitt mit Abweichungen von der mittleren Geschwindigkeit von bis zu 4 % am Rand. Der Turbulenzgrad der Anströmung ist in Abb. 5 dargestellt. Er beträgt ca. 4,5 %, was für technisch realisierbare Strömungen unter diesen Bedingungen einen annehmbaren Wert darstellt.

## Ergebnisse

Abb. 6 zeigt die Absolutgeschwindigkeitsverteilung einer Stereo-PIV Messreihe des Plättchens in ausgelenkter Position anhand von Schwarzweißkonturen. Deutlich sind die zwei Nachlaufgebiete unterschiedlicher Größe ober- und unterhalb des Plättchens zu sehen. Da der obere Ablösepunkt durch die vom Zylinder bekannte Ablösepunktschwingung weiter stromab verlagert ist, wird ein Teil der Hauptströmung nach unten abgelenkt, sodass ein Teil der abgelenkten Strömung mit der Plättchenhinterkante kollidiert. Dies zeigen die in die Messebene projizierten 2D-Stromlinien sehr deutlich. Je nach Größe des Nachlaufwirbels wird der Auftreffbereich kleiner bzw. größer.

Eine weitere wichtige Erkenntnis ist das Vorhandensein von Strukturen relevanter Größe in die dritte Raumrichtung. Dies wird in Abb. 7 belegt. Zum einen befinden sich diese zufällig verteilt im Nachlauf und zum anderen ist eine starke Querströmung am Ende der Hinterkante zu beobachten, auf die im weiteren Verlauf noch detaillierter eingegangen wird.

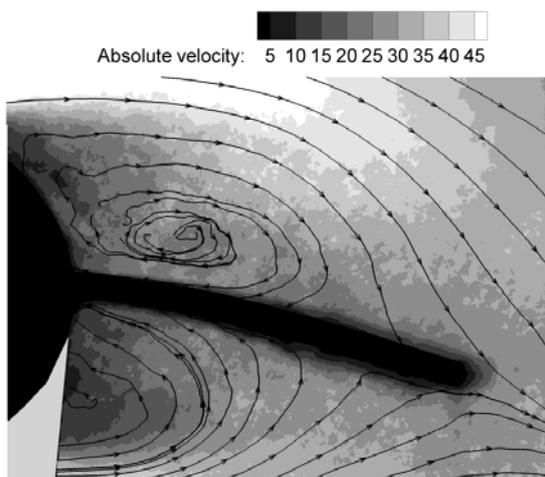


Abb. 6: Absolutgeschwindigkeit in [m/s]



Abb. 7: Geschwindigkeit in z-Richtung in [m/s]

Abb. 8 zeigt anhand von Geschwindigkeitsvektoren die Bahnen, entlang derer ein vom Zylinder kommender Wirbel im Verlauf einer Vollschiwingung des Plättchens transportiert wird. Die Strömungsrichtung verläuft in dieser Darstellung von rechts nach links. Es können grundsätzlich zwei Arten von Wirbeln unterschieden werden. Zum einen gibt es Wirbel die dem Plättchen zwar nahe kommen, dann jedoch, wie hier der auf der Unterseite, weitertransportiert werden. Zum anderen gibt es solche, die im hinteren Teil auf das Plättchen treffen und von diesem zerschlagen werden. Alle Wirbel entstehen bei etwa einer halben Plättchenlänge hinter dem Zylinder in unterschiedlichen Höhen (senkrecht zum Plättchen). Die Wirbel, die nicht zerschlagen werden, werden in der Nähe des Plättchens stark umgelenkt. Danach werden sie parallel zum Plättchen transportiert, um hinter der Plättchenhinterkante wieder auf ihre ursprüngliche Transportrichtung zu drehen.



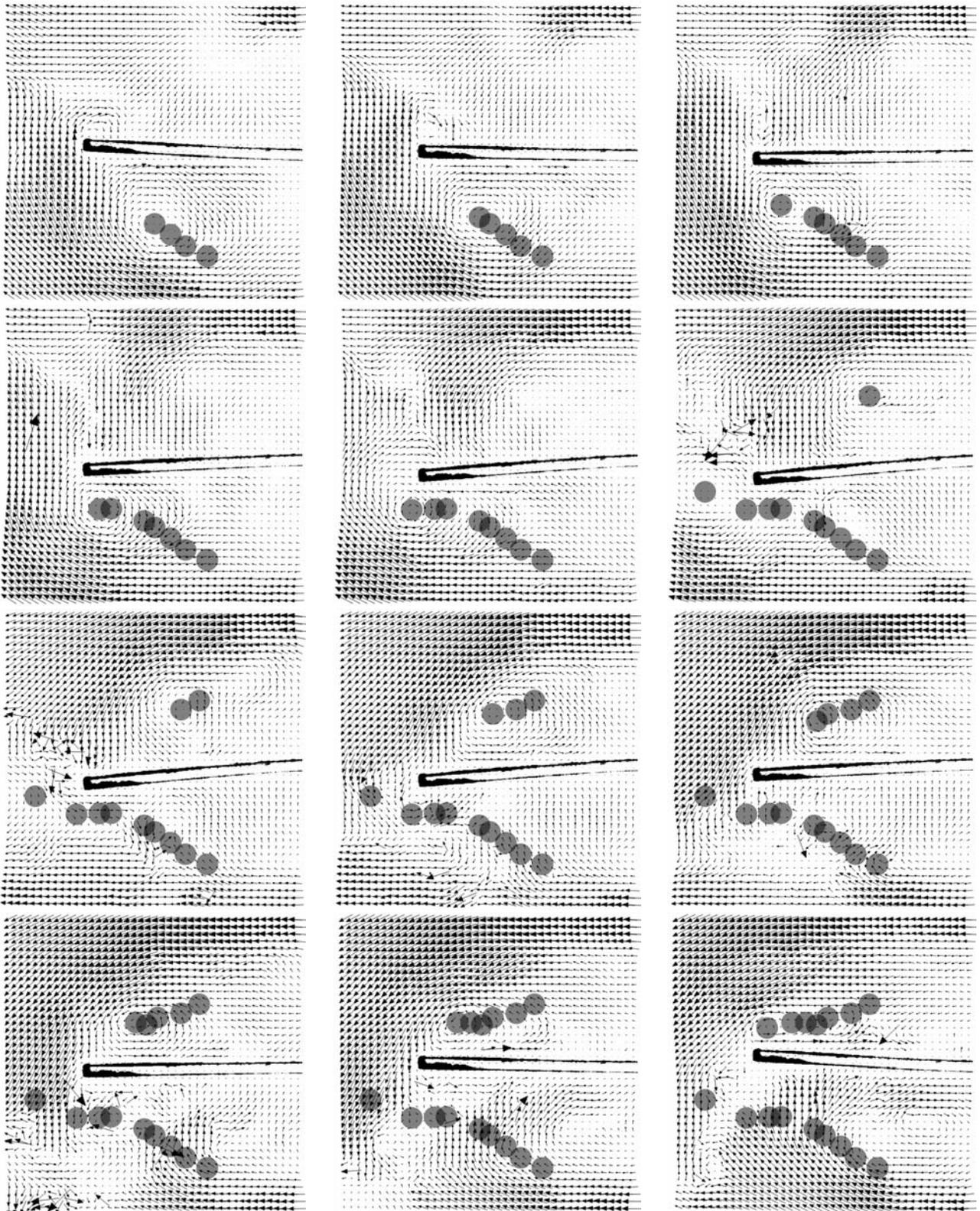
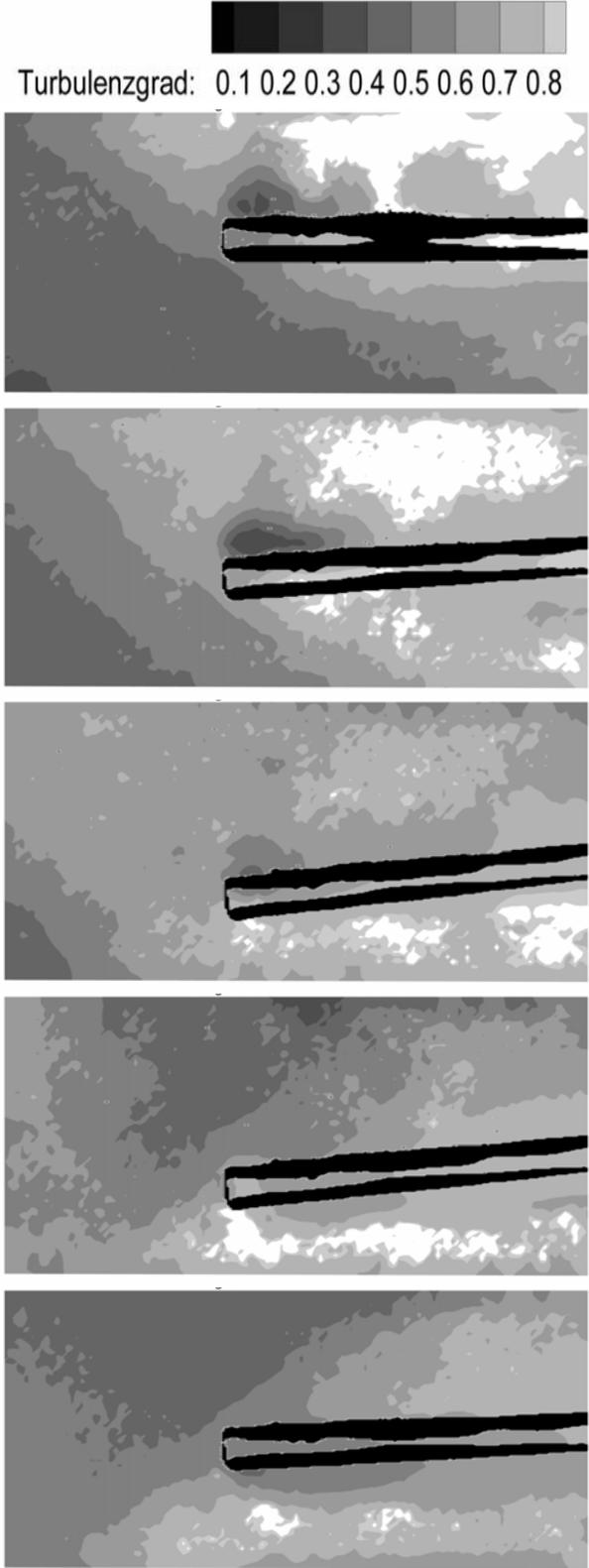
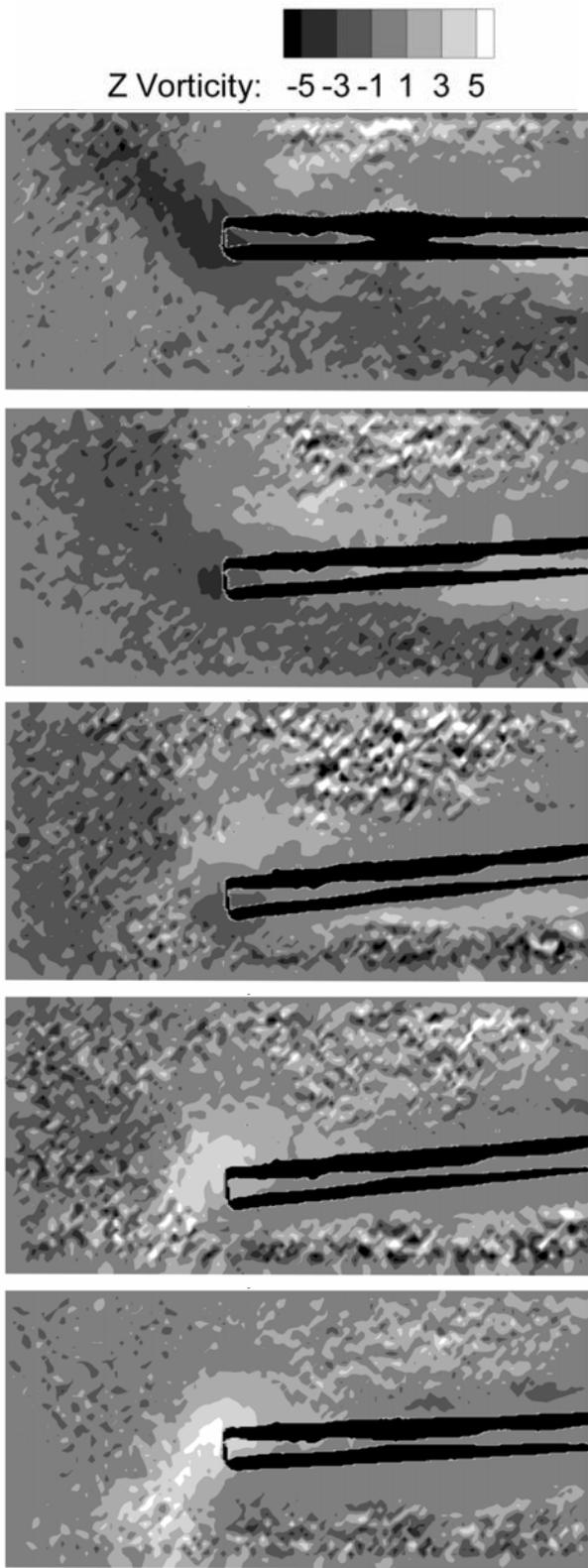


Abb. 8: Transport der Wirbel aus der Scherströmung zwischen Nachlauf und Hauptströmung (Geschwindigkeitsvektoren 2D)



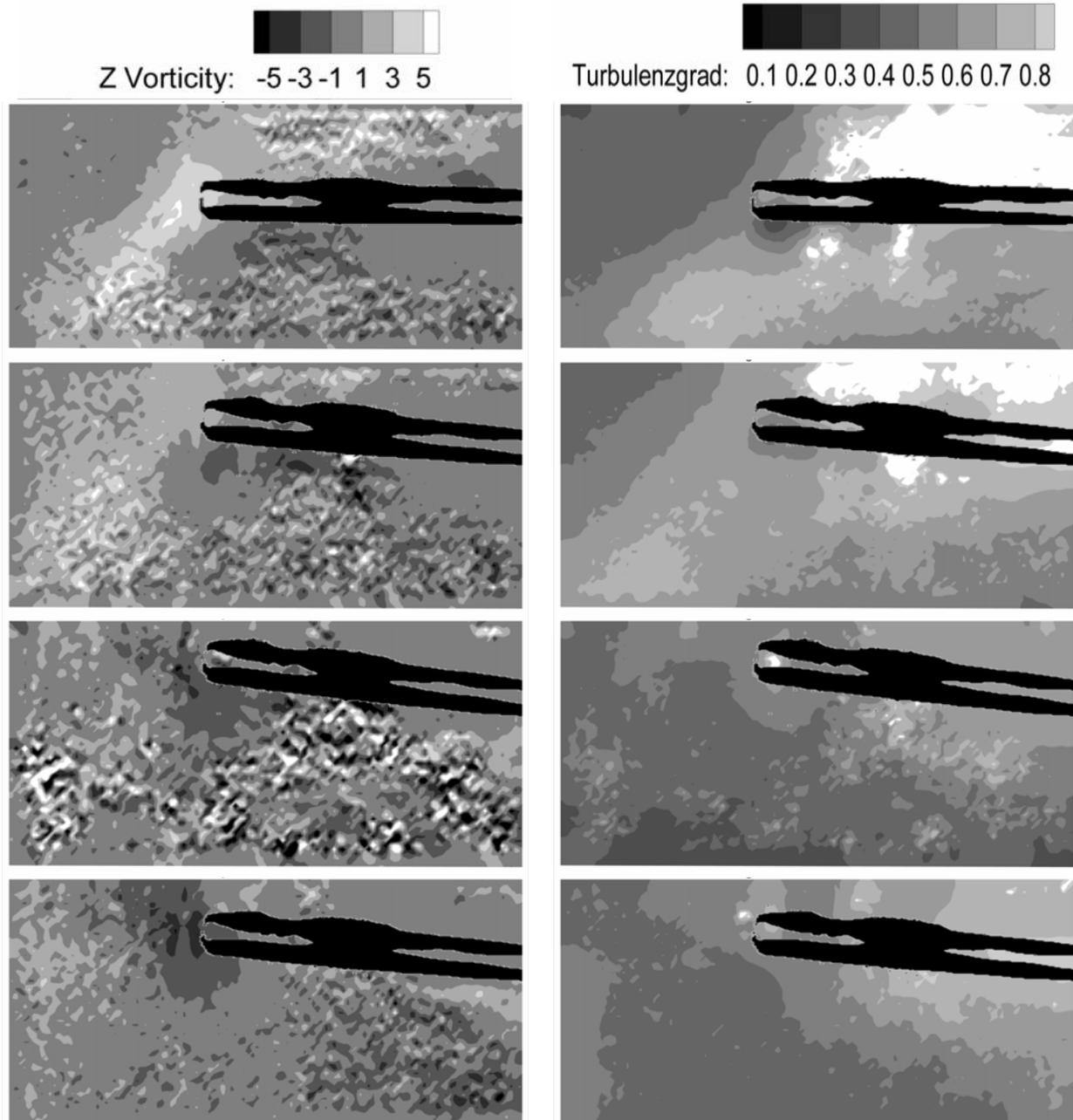


Abb. 9: Wirbelstärke und Turbulenzgrad für den Verlauf einer phasengemittelten Strömung

In Abb. 9 werden die Wirbelstärke und der Turbulenzgrad für eine phasengemittelte Vollschwingung des Plättchens gezeigt. Beim Turbulenzgrad fällt auf, dass je nach Plättchenposition und Bewegungsrichtung der Hinterkantenwirbel die Drehrichtung ändert. Geht man nun davon aus, dass der Hinterkantenwirbel für den Fluidtransport in die z-Richtung an dieser Stelle (siehe Abb. 7) verantwortlich ist, sollte sich somit nach der Rechten-Hand-Regel mit der Drehrichtung des Hinterkantenwirbels auch die Richtung der Geschwindigkeitskomponente  $w$  an dieser Stelle ändern. Bei Betrachtung des Turbulenzgrades in Abb. 9 bemerkt man zunächst bandartige Gebiete niedrigen Turbulenzgrades. Diese rühren daher, dass hier die durch die Ablösepunktschwingung am Zylinder umgelenkte Hauptströmung am Plättchen vorbeizieht (siehe auch Stromlinien in Abb. 6). Durch die erhöhte Absolutgeschwindigkeit senkt sich hier der Turbulenzgrad ab. Über und unter dem Plättchen finden sich Gebiete besonders hoher Turbulenz. Zum einen ist hier die Fluidgeschwindigkeit nicht so groß, zum anderen treffen hier im hinteren Bereich des Plättchens die Wirbel, die in der Nachlaufzone

erzeugt werden, auf das Plättchen und werden von diesem teilweise zerschlagen. Dieser Effekt sorgt hier zusätzlich zur niedrigen Absolutgeschwindigkeit für hohe Schwankungsgrößen und somit einen extrem hohen Turbulenzgrad.

Das Schwingungsverhalten des Plättchens wird im Wesentlichen durch zwei Effekte dominiert. Der Haupteffekt liegt in der Schwingung der Ablösepunkte an einem querangeströmten Zylinder. Er sorgt für ein periodisch schwingendes Strömungs- und Druckfeld, welches eine periodische Schwingung des Plättchens induziert. Der zweite Effekt liegt in den mit dem Plättchen interagierenden Wirbel. Diese haben jedoch unterschiedliche Größen und werden, wie in Abb. 8 gezeigt, teils vom schwingenden Plättchen zerstört, teilweise aber auch nur in ihrer Bahn verändert. Dieses führt zu einer stochastischen Überlagerung der oben bereits beschriebenen, periodischen Schwingung.

### Ausblick

Zunehmend verbesserte Auswerteroutinen im Bereich des Postprocessings bergen noch weiteres Potential in bereits vorhandenen Aufnahmen. Erste Erfolge im Bereich der Schwingungsanalyse wurden im Rahmen dieser Arbeit schon erbracht. So ist es möglich, punktuelle Beschleunigungen zeitlich zu analysieren und erste Aussagen über das Schwingungsverhalten von Beschleunigungen innerhalb einer Strömung zu treffen. Weiterhin ist es über Routinen möglich, voneinander unabhängige Messungen zu verknüpfen, indem man innerhalb von verschiedenen Messungen einander ähnliche Zustände sucht und diese miteinander kombiniert. Abb. 10 zeigt eine solche Verknüpfung. Hier wurde bei zwei unterschiedlichen Messreihen ein Bereich von 5,5 Schwingungsperioden gefunden, in welchem sich die beiden Messreihen bis auf 5 % Abweichung der Amplitude in den Totpunkten ähneln. Es wird deutlich, dass hier noch Potential in der statischen Analyse der Daten liegt.

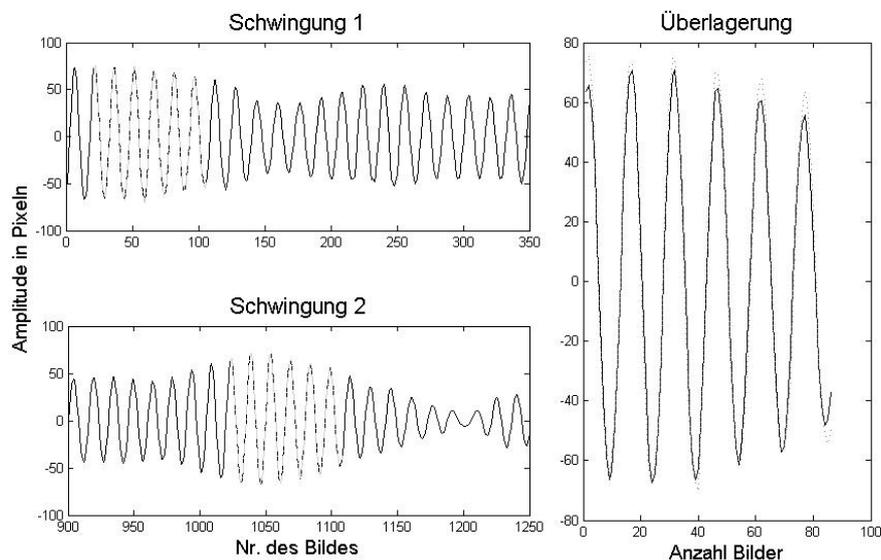


Abb. 10: Verknüpfung zweier unabhängiger Schwingungen

### Literatur

Schröder, A., Willert, C., 2008:"Particle Image Velocimetry - New Developments and Recent Applications", in:Topics in Applied Physics, Vol.112, Springer

Raffel, M., Willert, C., Wereley, S.,2007: " Particle Image Velocimetry - a practical guide", Springer