

## Experimentelle Untersuchung biologischer Mikroströmungen mittels Stereo- $\mu$ PIV

**M. Brede<sup>1</sup>, M. Witte<sup>1</sup>, G. Dehnhardt<sup>2</sup> und A. Leder<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Universität Rostock, Lehrstuhl Strömungsmechanik,  
Albert-Einstein-Str. 2, 18051 Rostock

<sup>2</sup> Ruhr-Universität Bochum, Lehrstuhl Allgemeine Zoologie & Neurobiologie  
Universitätsstr. 150, 44780 Bochum

### Zusammenfassung

Zur Untersuchung von Mikroströmungen wurde in den vergangenen Jahren ein auf Stereo-Mikroskopietechnik basierendes PIV-System entwickelt. Mit diesem Stereo- $\mu$ PIV System ist es erstmals möglich, instantane Felder des vollständigen Geschwindigkeitsvektors ( $u, v, w$ ) in einer Mikroströmung zu bestimmen. Wie Voruntersuchungen mit dem System gezeigt haben, ist es möglich, Felder bis zu minimalen Abmessungen von  $400\mu\text{m} \times 500\mu\text{m}$  mit etwa 2000 dreikomponentige Vektoren zu erfassen. Aktuelle Ergebnisse zeigen die instationäre, dreidimensionale Strömung hinter Säugetiervibrissen, die durch ihre Oberflächenstrukturierung eine Veränderung der Turbulenzeigenschaften im Nachlauf im Vergleich zum geraden Zylinder bewirken.

### Einleitung

Biologische Organismen können durch selektive Prozesse im Laufe der Evolution mitunter spezielle Strömungsphänomene so nutzen, dass erstaunliche sensorische oder motorische Leistungen vollbracht werden. Die mit diesem System bislang untersuchten Konfigurationen umfassen insbesondere Strömungen aus der Biologie und Medizin: Vibrissen mariner Säuger (Ortung von Beutefischen), Cordylophora-Polypen (effiziente marine Filtrierorganismen).

Um eine detaillierte Strömungsuntersuchung an solchen Konfigurationen zu ermöglichen, die ein typisches Beobachtungsfeld von  $1\text{ mm} \times 1\text{ mm}$  aufweisen, wurde am LSM das Stereo- $\mu$ PIV System entwickelt. Mit diesem System ist es möglich, den vollständigen Geschwindigkeitsvektor als Feld in der gesamten Beobachtungsebene instantan zu erfassen. Im Gegensatz zu früheren Verfahren (Klank 2001) ist eine zeitliche Mittelung zur Messung des 2D-3C Geschwindigkeitsfeldes nicht notwendig. Dies ist besonders interessant für die Untersuchung instationärer Mikroströmungen in Mischern oder in biologischen Systemen.

Das Messprinzip basiert auf der particle image velocimetry (PIV) die bereits mit großem Erfolg auf Mikroströmungen angewendet wird (Meinhardt et al. 1999, Santiago et al. 1998). Im vorliegenden Versuchsaufbau wird ein Stereo-Mikroskop verwendet, so dass die Möglichkeit entsteht, nach der Stereo-PIV Methode (Prasad 1993) instantane 2D-3C Geschwindigkeitsfelder in der Mikroströmung zu messen, siehe Oschatz et al. (2004), Brede et al. (2006). Der folgende Abschnitt beschreibt den aktuellen Aufbau.

### Aufbau des Stereo- $\mu$ PIV Systems

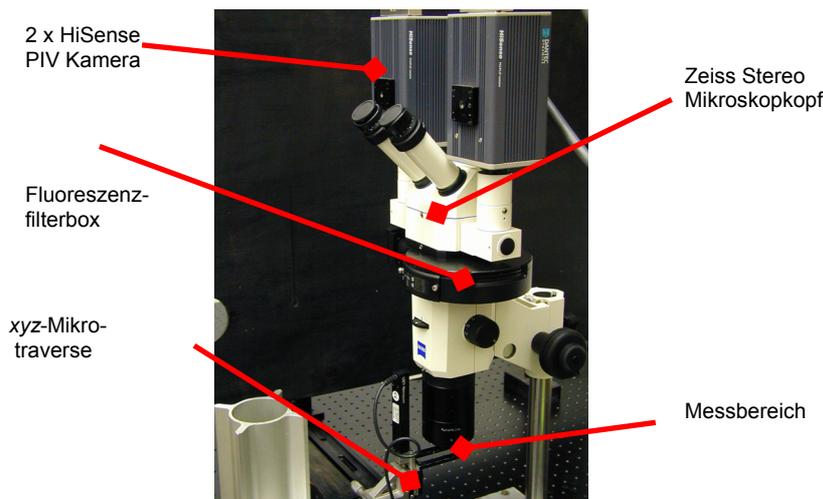


Abbildung 1: Experimenteller Aufbau des Stereo- $\mu$ PIV Systems

Das Stereo- $\mu$ PIV-System, siehe Abb. 1, besteht aus zwei PIV-Kameras, einer Filterkassette, dem Stereo-Mikroskop-Grundkörper, einem Objektiv, einem Beleuchtungsaufbau und einer drei-Achsen Mikropositionierung. Als Kameras werden Dantec Hi-Sense PIV-Kameras mit 1280 Pixel x 1024 Pixel Auflösung verwendet. Diese sitzen auf dem Stereo-Kopf eines Zeiss Stemi 11 Mikroskops. Die darunter liegende Filterkassette erlaubt die Verwendung von Filtersätzen zur Lichteinkopplung und -trennung bei der Epifluoreszenzmikroskopie. Das Objektiv ist ein Leica planapo 2x mit einem kurzen Objektabstand von 15 mm. Das Objektiv erlaubt einen Stereowinkel zwischen den Beobachtungsrichtungen von etwa 31°. Die zwei CCD-Kameras erzeugen ein Doppelbilderpaar des in der Strömung aufleuchtenden Streuteilchenbildes. Jedes Doppelbild wird kreuzkorreliert, die dritte Geschwindigkeitskomponente (senkrecht zur Beobachtungsebene) ergibt sich aus der konventionellen Stereo-PIV Vektorverarbeitung (Prasad und Adrian 1993). Mit diesem Aufbau können Geschwindigkeitsfelder bis zu einer minimalen Größe von 400  $\mu\text{m}$  x 500  $\mu\text{m}$  mit einer Abtastfleckengröße bis zu minimal 12  $\mu\text{m}$  x 12  $\mu\text{m}$  verarbeitet werden.

Die zwei Beleuchtungsoptionen werden in Abbildung 2 dargestellt. Im linken Aufbau wird das Licht aus einer grünen 5W LED im Durchlichtverfahren verwendet. Da keine optische Filterung notwendig ist, wird eine ausreichende Partikelsichtbarkeit erzielt. Diese Beleuchtungsart stellt das Standardverfahren für die Untersuchungen an biologischen Organismen dar, für die eine Beleuchtung mit Pulsen von etwa 0,5 mJ Energie verträglich ist. Die zweite Beleuchtungsoption verwendet eine Filterkassette aus dichroitischen Spiegeln zur Trennung von Anregungs- und Fluoreszenzlicht. Sie erlaubt eine koaxiale Auflichtbeleuchtung von Fluoreszenzpartikeln, die der Strömung zugegeben werden. Die vorliegenden Messungen in biologischen Strömungen wurden mit Polyamid-Partikeln mit 5 $\mu\text{m}$  Durchmesser durchgeführt.

Der Versuchskanal für biologische Strömungen weist einen Kanalquerschnitt von 15 mm x 30 mm und wurde in seiner Baugröße so kompakt ausgelegt, dass er von einer Mikro-Dreiaxsentraverse bewegt werden kann, die eine minimale Schrittweite von 0,2  $\mu\text{m}$  erlauben. Die Vertikalbewegung der Anordnung mittels Mikropositionierung wird außerdem zur Bewegung eines Punktmusters zur Kalibrierung des Stereo-PIV-Aufbaus verwendet.

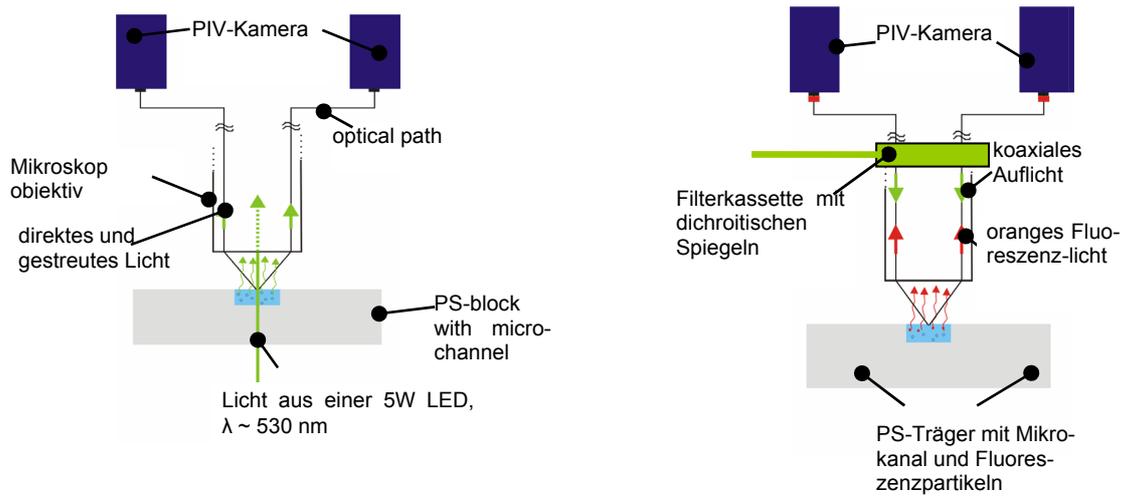


Abbildung 2: Beleuchtungsoptionen: direkte Beleuchtung (links), koaxiale Aufsichtbeleuchtung bei Verwendung von Fluoreszenzpartikeln (rechts)

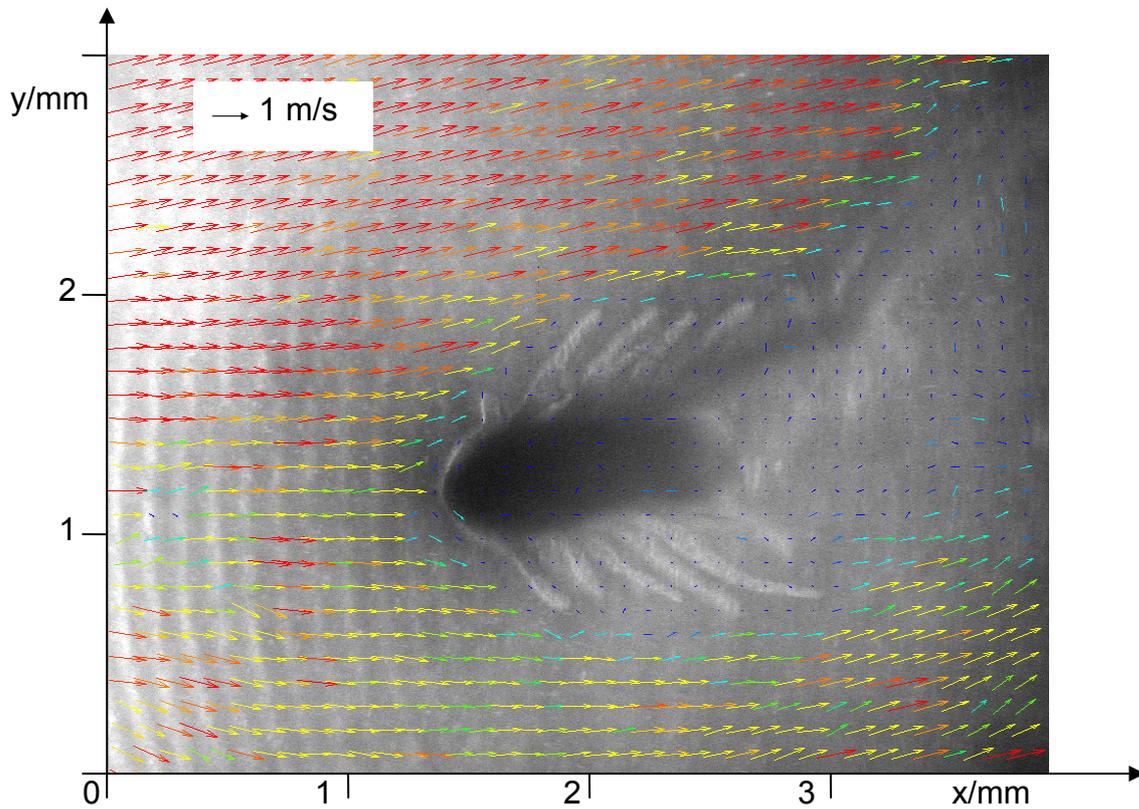


Abbildung 3: instantanes Geschwindigkeitsfeld an einem Cordylophora-Polypen

## Ergebnisse

Ein Beispiel für eine instationäre biologische Mikroströmung ist die Umströmung eines Brackwasserpolyphen, *Cordylophora Caspia*. Dieser Polyp ist als Filtrierer von Schmutzpartikeln weit verbreitet und für die Sauberkeit von Küstengewässern von erheblicher Bedeutung. Strömungsmechanisch stellt der Polyp einen stumpfen Körper dar, der seine Form der Strömungsgeschwindigkeit anpasst. Da die Filtrierwirkung abhängig von der Position der Polypentakel relativ zur Anströmung ist, wurde der Polyp bei verschiedenen Anströmgeschwindigkeiten mit Hilfe von  $\mu$ PIV untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass bei zunehmenden Anströmgeschwindigkeiten die durchströmte Querschnittsfläche abnimmt, der Volumenstrom im mittleren Geschwindigkeitsbereich durch den Polypen also näherungsweise konstant gehalten wird. Details zur Wirksamkeit des Polypen unter verschiedenen Bedingungen sind bei Kolbatsch-Weremtschuk (2006) angegeben. Die besonderen Anforderungen der Messung lagen hier in der Verwendung lebender Organismen, die nur eine geringe Beleuchtungsstärke im Durchlichtverfahren (Abb. 2 links) erlauben und sich darüber hinaus auch in ständiger Bewegung befinden, so dass instantane Messfelder ausgewertet werden mussten.

Ein Beispiel für eine biologische Mikroströmung mit ausgeprägtem dreidimensionalem Charakter ist die Umströmung einer strukturierten Säugetiervibrisse. Die Vibrisse („Barthaar“) weist eine dreidimensionale Struktur auf, die als durchmessermodulierter Zylinder mit elliptischem Querschnitt annähernd beschrieben werden kann. Der Querschnitt der Vibrisse hat eine mittlere Breite von etwa 0,2 mm, der mittlere Durchmesser in Strömungsrichtung weist etwa 0,6 mm auf. Bei einer Anströmgeschwindigkeit von 0,4 m/s ergibt sich im Mittel eine Reynoldszahl von 160. Mit Hilfe des Stereo- $\mu$ PIV Systems ist es nun möglich, den dreidimensionalen Charakter des Strömungsfeldes zu erfassen. Insgesamt wurde ein Feld von  $(x \cdot y \cdot z) = 1,65 \text{ mm} \cdot 2,55 \text{ mm} \cdot 3 \text{ mm}$  untersucht. In Abb. 4 ist ein Strömungsfeld der Ebene  $z = 0,66$  im Nachlauf der Vibrisse dargestellt. Farblich ist die Vertikalgeschwindigkeit  $w$  wiedergegeben, das Vektorfeld zeigt die Geschwindigkeitskomponenten  $u$  und  $v$  in der Ebene. Das Geschwindigkeitsfeld erscheint zunächst wie der Nachlauf eines geraden Zylinders, lediglich die zeitgemittelten Vertikalkomponenten kommen hinzu. Die verwendete Stereo- $\mu$ PIV-Technik erlaubt es nun erstmals, auch die turbulenten Schwankungen zu ermitteln, die in Abb. 5 dargestellt sind. Während die Reynoldsspannung  $\overline{u'^2}$  (oben) eine weitgehende Ähnlichkeit zum geraden Zylinder aufweist, ist bei der Reynoldsspannung  $\overline{u'w'}$  hinsichtlich der räumlichen Verteilung der Intensität eine andere Struktur als beim Nachlauf eines geraden Zylinders festzustellen. Hier fällt insbesondere die Verbindung der Maximalgebiete von  $\overline{u'w'}$  in der Symmetrieebene  $y = 0$  auf. Erste, noch nicht vollständig ausgewertete Messungen am geraden Zylinder zeigen hier getrennte Gebiete.

Werden alle 13 gemessenen x-y Nachlaufebenen zu einem Volumendatensatz zusammengesetzt, wird der dreidimensionale Charakter der Strömung offensichtlich. In Abbildung 6 ist die Ausdehnung des Rezirkulationsgebiets anhand der Isofläche  $u=0$  dargestellt. Die Farbverteilung zeigt die turbulente kinetische Energie  $k$ . Die Länge des Rezirkulationsgebiets in Hauptströmungsrichtung korreliert stark mit der Durchmesservariation der Vibrisse. Die Komplexität der dreidimensionalen Strömung soll mit Hilfe von Stromliniengruppen verschiedener Startpunkte dargestellt werden. Die in Abb. 7 gezeigten Stromlinien weisen zwar in die x-y Eben projiziert ein stationäres Wirbelpaar auf, tatsächlich findet aber in der z-Richtung ein deutlicher Vertikaltransport statt, wie anhand Farbcodierung der Ausgangspunkte der Stromlinien zu erkennen ist.

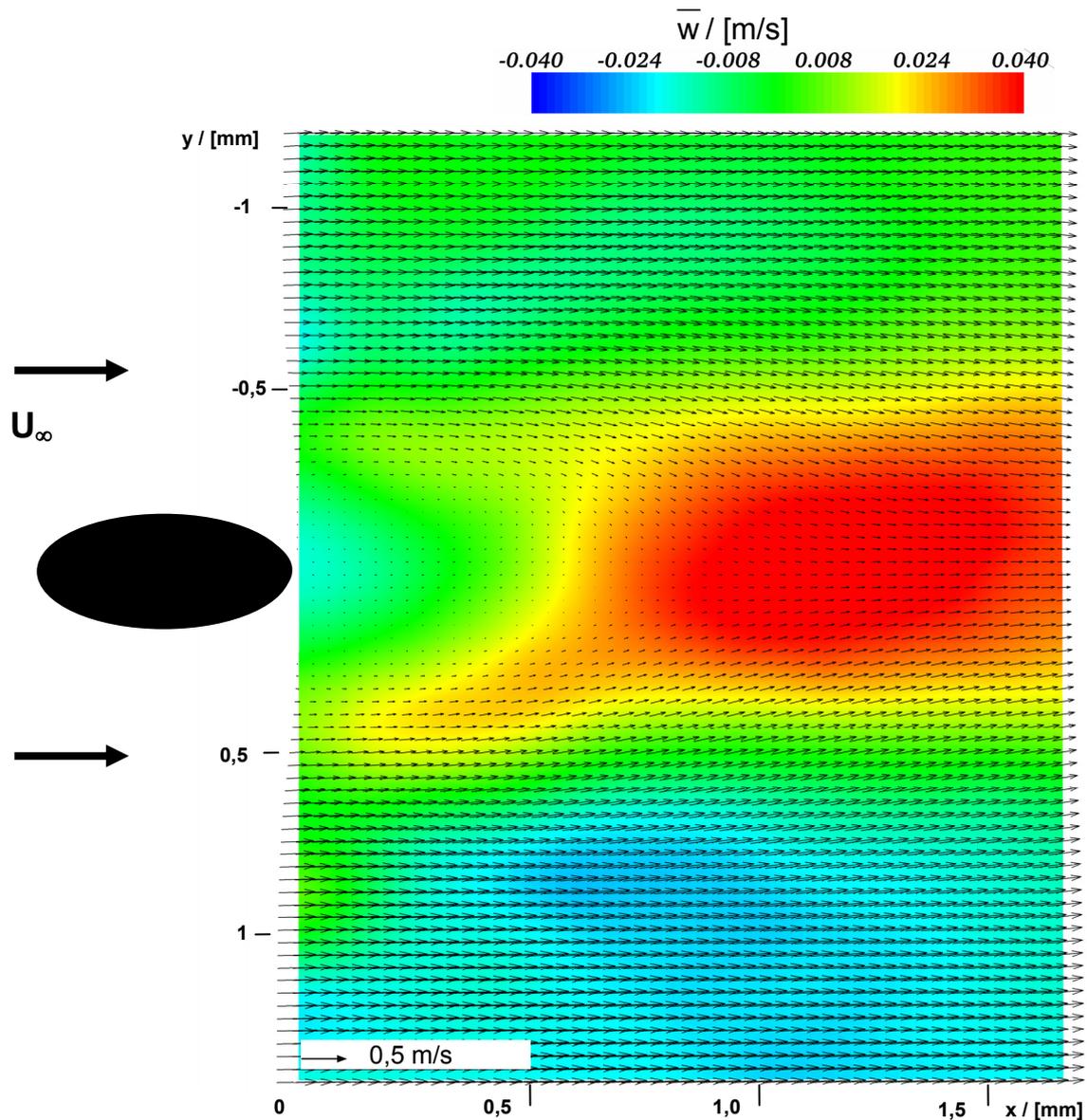


Abbildung 4: zeitgemittelter Nachlauf hinter einer Vibrisse, Vektorfeld  $(u,v)$  in der Ebene  $z = 0,66$  mm, Farbkontur: Geschwindigkeitskomponente  $w$ ,  $Re = 160$

### Zusammenfassung

Mit Hilfe des Stereo- $\mu$ PIV-Systems konnten verschiedene biologische Mikroströmung erstmals experimentell untersucht werden. Am Beispiel der Umströmung eines lebenden Cordylophora-Polypen wurde gezeigt, dass sich auch Geschwindigkeitsfelder in instationären Mikroströmungen hinreichend gut erfassen lassen. Die Ergebnisse konnten wesentlich zur Ermittlung der Filtrierwirkung dieser Organismen unter verschiedenen Strömungsbedingungen beitragen.

Mit der kürzlich begonnenen Untersuchung der Nachlaufströmung einer strukturierten Vibrisse wurde eine stark dreidimensionale instationäre Strömung erfasst. Dabei konnte das dreikomponentige Geschwindigkeitsvektorfeld in einem durch Schnittebenen dargestellten Volumen bestimmt werden. Die Ergebnisse zeigen nicht nur den dreidimensionalen Charakter der Strömung, sondern mit Hilfe der Bestimmung des Reynoldsschen Spannungstensors

# 53.6

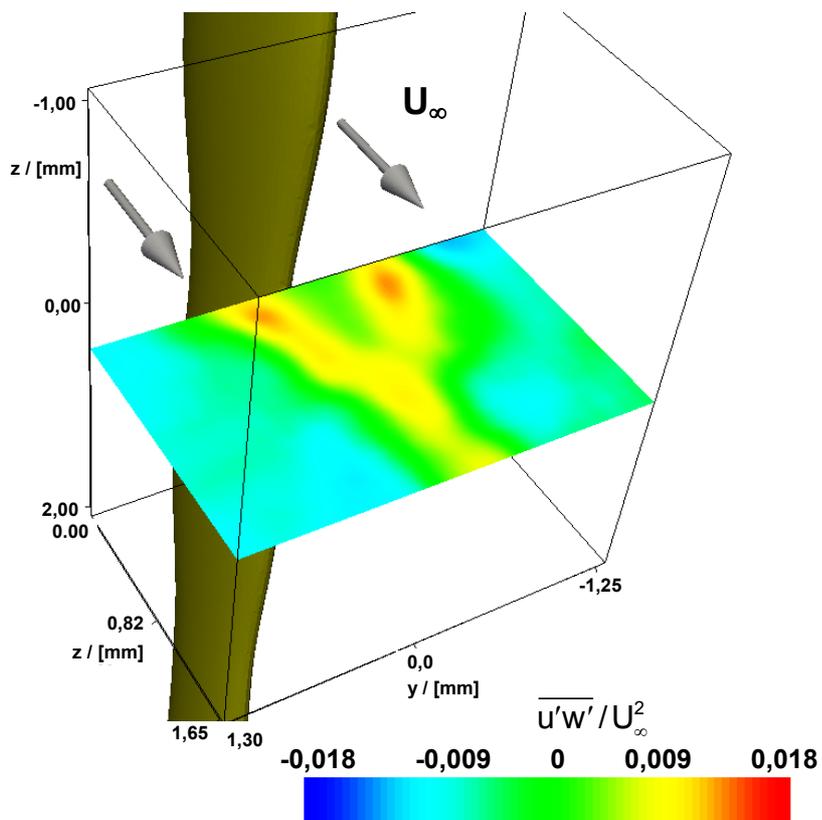
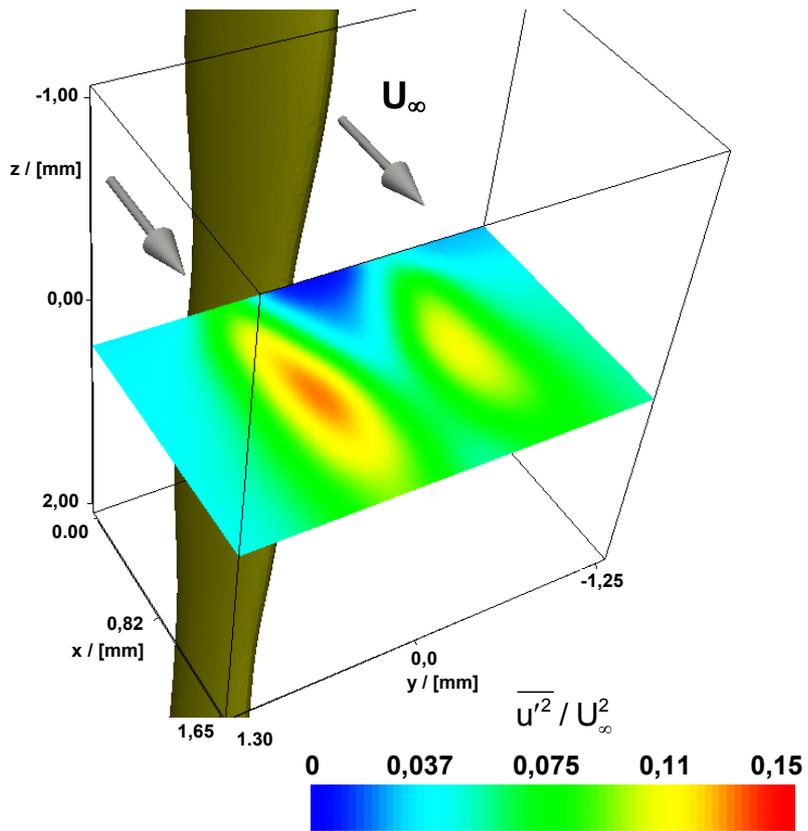


Abbildung 5: zeitgemittelter Nachlauf hinter einer Vibrisse, Ebene  $z = 0,66$  mm, Farbverteilung:  $\overline{u'^2} / U_\infty^2$  (oben) und  $\overline{u'w'} / U_\infty^2$  (unten),  $Re = 160$

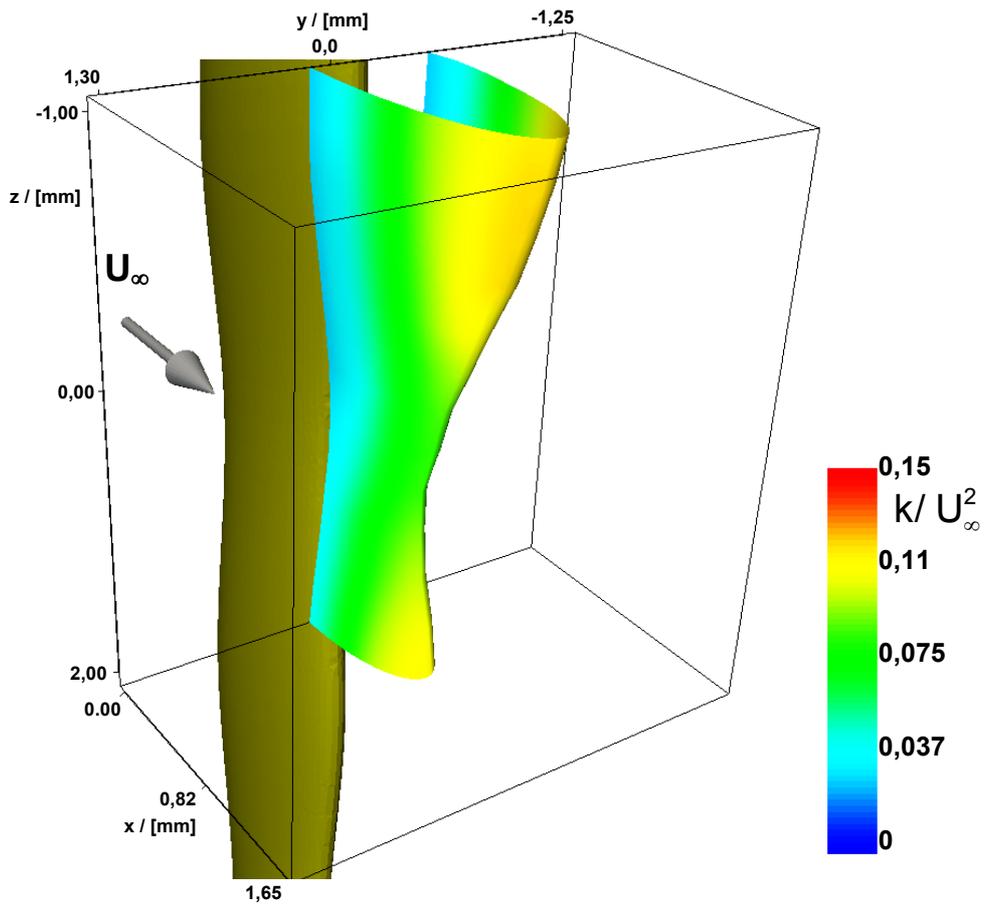


Abbildung 6: zeitgemittelter Nachlauf hinter einer Vibrisse, Isofläche des Rezirkulationsgebiets ( $u = 0,0$ ), Farbverteilung: turbulente kinetische Energie  $k / U_{\infty}^2$ ,  $Re = 160$

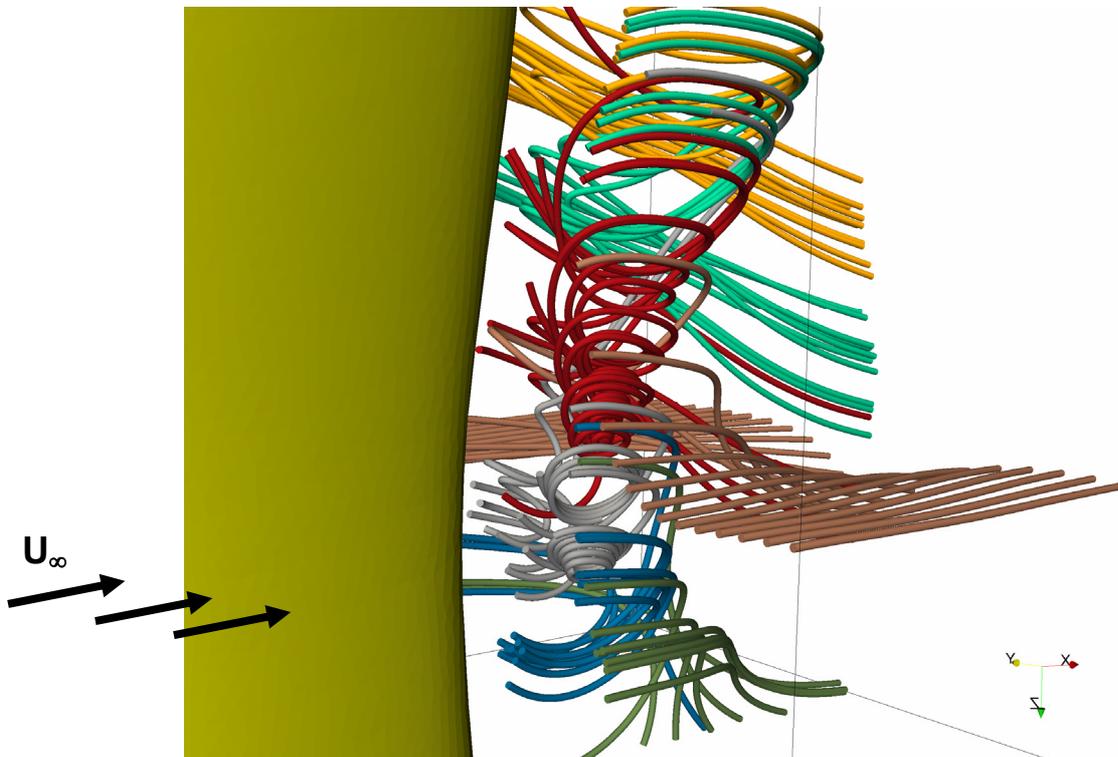


Abbildung 7: zeitgemittelter Nachlauf hinter einer Vibrisse, Stromlinien im gemessenen Volumen mit farbig markiertem unterschiedlichem Startbereich

auch deutliche Unterschiede zu den Turbulenzeigenschaften zweidimensionalen Zylinderumströmungen.

Im nächsten Entwicklungsabschnitt soll das Stereo- $\mu$ PIV System mit einer stärkeren Beleuchtungseinrichtung ausgestattet werden.

### Danksagung

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die Förderung im Rahmen des DFG-Schwerpunktprogramms 1207 „Strömungen in Natur und Technik“

### Literatur

- Brede, M., Witte, M. und Leder, M. (2006): Stereo-Micro PIV measurements of the three-dimensional separated flow in the wake of a backward facing step, Proceedings of the 13th International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, Lisbon, June 26<sup>th</sup> -29<sup>th</sup>, 2006
- Klank, H.; Goranovic, G.; Kutter, J.P.; Gjelstrup, H.; Michelsen, J.; Westergaard, C.H. (2001): Micro PIV measurements in micro cell sorters and mixing structures with three-dimensional flow behaviour, Proceedings of the 4th International Symposium on Particle Image Velocimetry, Göttingen, Germany, September 17-19, 2001
- Kolbatsch-Weremtschuk, S. (2007): Strömungsdynamik von *Cordylophora caspia* (Pallas, 1771), Diplomarbeit, Universität Rostock
- Meinhart, C. D., Wereley, S. T., Santiago, J. G.; (1999); PIV measurement of a micro channel flow. Exp. Fluids 27; 414-419
- Meinhart, C.D.; Wereley, S.T.; Gray M.H.B. (2000): Volume illumination for particle image velocimetry, Meas. Sc. Tech. 11, p. 809-814
- Oschatz, L.-G., Brede, M., Delgado A., Leder, A. (2004): Untersuchung mikroskopischer Strömungsstrukturen mit Hilfe der Particle Image Velocimetry (PIV). Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik, 12. Fachtagung, Karlsruhe; 43-1 – 43-5
- Prasad, A.K.; Adrian, R.J. (1993): Stereoscopic particle image velocimetry applied to liquid fluid flows, Exp. Fluids 15, p. 49-60