

## **UNTERSUCHUNGEN DER INSTATIONÄREN STRÖMUNGSTOPOLOGIE IM NACHLAUF EINER SEEHUNDVIBRISSE**

### **INVESTIGATION OF THE UNSTEADY FLOW STRUCTURE IN THE WAKE OF A HARBOUR SEAL VIBRISSA**

**M. Witte, M. Michael, M. Brede und A. Leder**

Universität Rostock, Lehrstuhl Strömungsmechanik  
Albert-Einstein-Straße 2  
18059 Rostock

Nachlaufströmungen, Biologische Strömungen, Maritime Strömungen, DNS  
flow around bluff bodies, wake flows, dns, biological flows, passive flow control

#### **Zusammenfassung**

Die Vibrissen von Seehunden zeichnen sich durch eine komplizierte dreidimensionale Strukturierung aus. Sie versetzen den Seehund in die Lage, hydrodynamische Nachlaufspuren von Beutefischen zu detektieren. Mit Hilfe von Stereo- $\mu$ Piv Messungen an Seehundvibrissen konnte die stationäre Strömungstopologie des Vibrissennachlaufes ermittelt werden. Zum besseren Verständnis der Funktion der Vibrissenstrukturierung ist es notwendig, die instationäre Strömungstopologie zu kennen. Durch räumlich und zeitlich hochauflösende numerische Verfahren konnte die instationäre Strömungstopologie im Nachlauf einer Seehundvibrisse ermittelt werden.

#### **Einleitung**

Aktuelle Experimente demonstrieren die Leistungsfähigkeit des Vibrissensystems maritimer Säugetiere. Seehunde werden durch ihr Vibrissensystem befähigt, hydrodynamische Spuren aus der Bewegung heraus zu detektieren und zu verfolgen. Dieses Verhalten wird unabhängig von der Existenz zusätzlicher akustischer oder visueller Reize beobachtet (Dehnhardt, Muck, Bleckmann 1998).

Die Nachlaufströmung einer Seehundvibrisse gehört zur Klasse der Nachlaufströmungen stumpfer Körper und könnte in weiten Teilen vergleichbar sein mit der eines quer angeströmten langen Kreiszylinders. Ab einer Reynoldszahl größer 45 kommt es an zylinderförmigen Körpern zur Ausbildung einer primären Instabilität. Die beiden seitlichen Scherschichten lösen wechselseitig periodisch ab, es entsteht die sogenannte Kármánsche Wirbelstraße. Mit steigender Reynoldszahl treten neben den Primärwirbeln Sekundärwirbel auf, die die zunächst zweidimensionalen und ebenen Primärwirbel dreidimensional verformen. Bei steigender Reynoldszahl kommt es zur Bildung von Kelvin-Helmholtz Wellen in der abgelösten Scherschicht. Bei einer genauen Betrachtung der Vibrissen eines Seehundes sind jedoch signifikante Unterschiede im Vergleich zum geraden Kreiszylinder festzustellen (Abb.1).

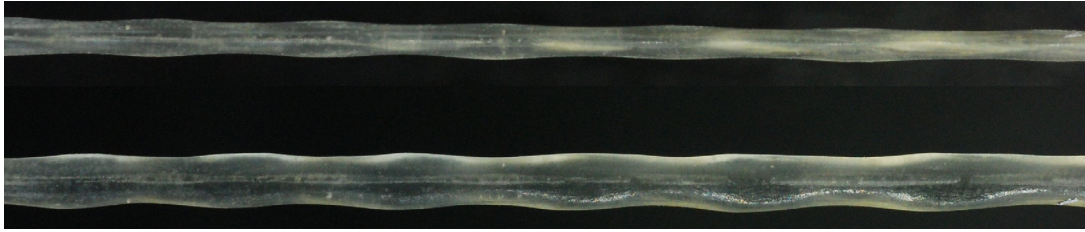


Abb. 1: Geometrie einer Seehundvibrisse

Neben einer elliptischen Grundquerschnittsform ist eine ausgeprägte Dickenmodellierung in Vibrissenspannungsrichtung zu erkennen. Durch die Konturierung beider Halbachsen entsteht eine komplexe dreidimensionale Vibrissengeometrie. Vergleichsmessungen mit unstrukturierten Vibrissen legen nahe, dass die Strukturmodellierung der Vibrissen ein wesentlicher Bestandteil eines Systems für die passive Strömungskontrolle darstellt und zur Unterdrückung oder frühzeitigen Zerstörung der Kármánschen Wirbelstraße beiträgt. Die dynamische Kraftwirkung auf die Seehundvibrisse resultiert dann nicht primär aus deren Umströmung, sondern aus der Wechselwirkung mit anderen hydrodynamischen Spuren (Beutetieren). Um den Mechanismus der Strömungsbeeinflussung der Vibrissen zu verstehen, der diesen ermöglicht, als Sensororgan für hydrodynamische Spuren zu dienen, wurden Stereo- $\mu$ PIV Messungen an echten Vibrissen und numerische Strömungssimulationen an modellierten Vibrissen durchgeführt. Diese Untersuchungen erfolgen im Rahmen des DFG-Schwerpunktprogramms 1207 „Strömungen in Natur und Technik“.

## Experimenteller Aufbau und Ergebnisse

Für die experimentellen Untersuchungen wurde ein Stereomikroskop mit zwei optischen Wegen in einem Objektiv verwendet (Abb. 2). Als Lichtquelle diente eine 5W LED, mit der eine Volumenbeleuchtung realisiert wurde. Nur Partikel innerhalb der Korrelationstiefe gehen in die Kreuzkorrelationsanalyse zur Bestimmung der Partikelverschiebung ein. Die Korrelationstiefe beträgt für die im Experiment gewählte Auflösung, etwa  $60\ \mu\text{m}$  (Nguyen 2002).

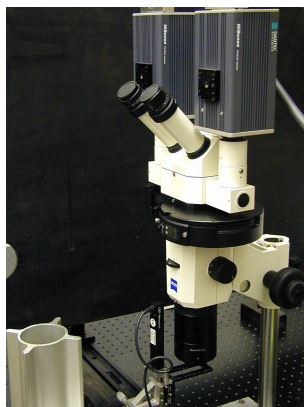


Abb. 2: Stereo- $\mu$ PIV System

**Kameras:**  
2 x Dantec HiSense  
Auflösung 1280x1024

**Mikroskop:**  
min. Objektfeld:  
 $400\ \mu\text{m} \times 500\ \mu\text{m}$   
Schärfentiefe:  $20\ \mu\text{m}$   
Koaxiale Durchlichtbeleuchtung (5W LED)

**Lineartisch mit Steuerung:**  
Newport M461-XYZ-M  
Max. Verfahrweg [mm]: 12,5  
Min. Schrittweite [ $\mu\text{m}$ ]: 0.2

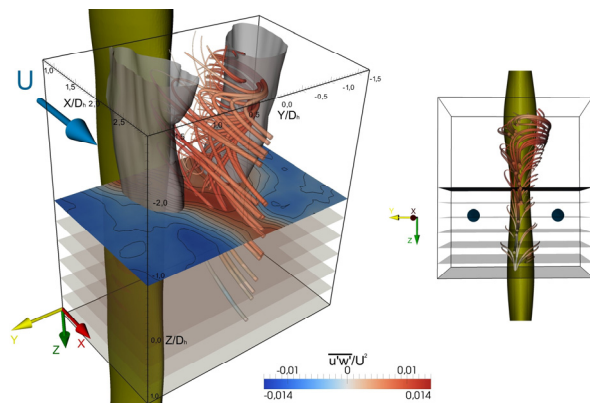


Abb. 3: Experimentell bestimmtes Geschwindigkeitsfeld aus Stereo- $\mu$ PIV Messungen  
Grau: Isofläche  $\lambda_2 = -0.075$   
Farbig:  $\langle u'w' \rangle / U^2$   
Graue Flächen repräsentieren die Messebene

Die ersten Messungen wurden an einer Vibrisse mit einem mittleren hydraulischen Durchmesser  $d_h$  von  $0.75\text{mm}$  und einer Reynoldszahl von 297 durchgeführt. Entlang der Vibrissen-

längsachse wurden 13 Ebenen vermessen. Der Abstand der Messebenen in z – Richtung betrug 0.25mm. Die Abmessungen der x-y Messebenen betrugen 1.65mm x 2.55mm.

Die instantanen Geschwindigkeitsfelder jeder einzelnen Messebene wurden zeitgemittelt und zu einem 3D-3C Volumendatensatz rekonstruiert. Für die Mittelung wurden pro Messebene 500 instantane 2D-3C Geschwindigkeitsfelder benutzt. Neben dem zeitgemittelten Geschwindigkeits-, Wirbelstärke- und dem Skalarfeld des  $\lambda_2$  Kriteriums wurde auch der vollständige Reynoldssche Spannungstensor bestimmt (Abb. 3). Aus den ermittelten maximalen Amplituden der Reynoldsspannungen konnte eine signifikante Ähnlichkeit zu den axialsymmetrischen Scherschichten festgestellt werden (Leder 1992). Die experimentell festgestellte Ähnlichkeit zu dem Verhalten axialer Scherschichten kann dabei als Nachweis einer Störung der üblicherweise an stumpfen Körpern auftretenden Primärwirbelstraße verstanden werden.

## Numerische Untersuchungen

Neben den experimentellen Untersuchungen, aus denen bislang nur zeitgemittelte Volumendatensätze rekonstruiert werden konnten, möchte man mit Hilfe von räumlich und zeitlich hochauflösenden numerischen Verfahren Erkenntnisse über die instationäre Strömungstopologie im Nachlauf der Seehundvibrisse gewinnen. Für die Definition eines Vibrissenoberflächenmodells wurde ein Ensemble an Seehundvibrissen optisch vermessen. Aus den 80 vermessenen Undulationen konnten die wesentlichen geometrischen Parameter bestimmt und eine CFD taugliche Oberflächenform für eine Standardvibrisse definiert werden (Abb. 4).

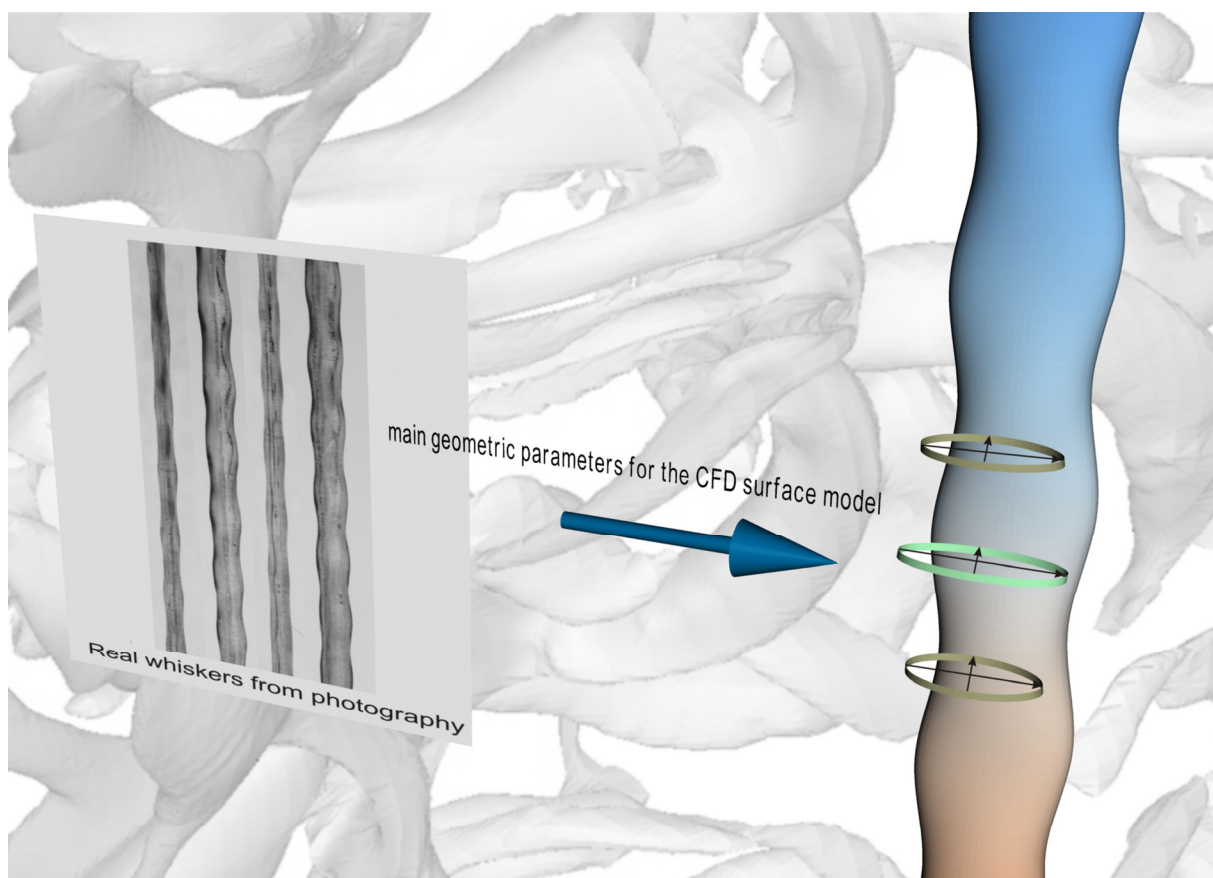
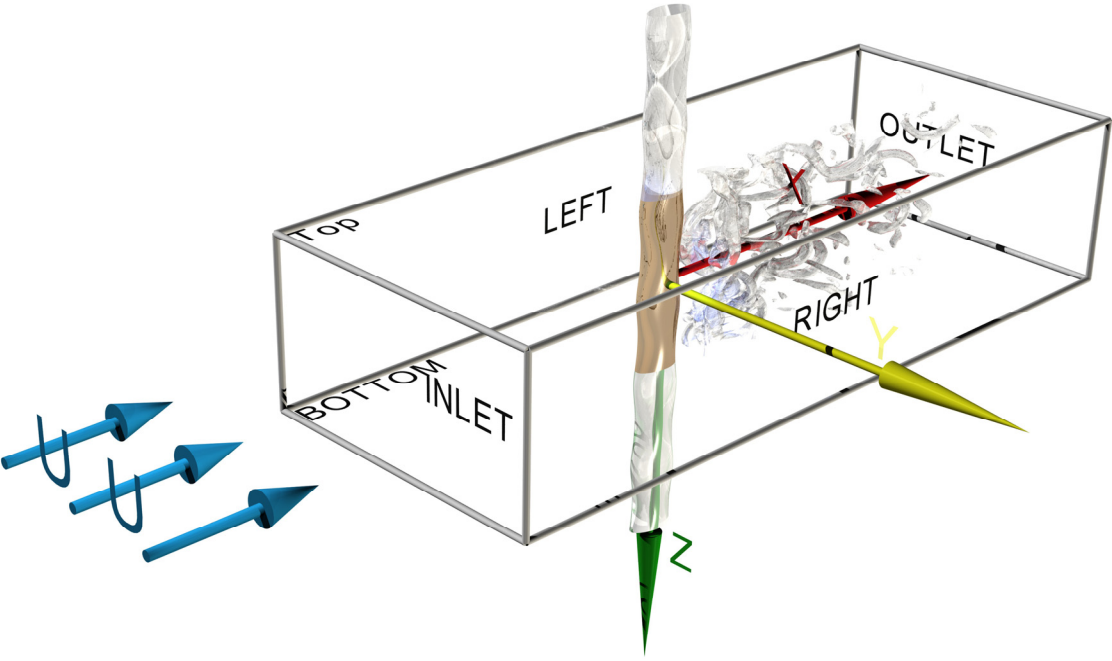


Abb. 4: Oberflächenrekonstruktion des Vibrissen CFD Modells

Für die Berechnungen wird die freie Numerikbibliothek openFOAM und für die Gittergenerierung ANSYS ICEM-CFD verwendet. Die Lösung der Navier-Stokes-Gleichungen erfolgt auf

Basis der Finite-Volumen-Methode. Für die geometrische Diskretisierung wurde ein blockstrukturiertes Gitter verwendet. Für die räumliche Diskretisierung der Navier-Stokes-Gleichungen wurde ein kubisches Differenzenverfahren verwendet, für die zeitliche Diskretisierung ein Verfahren 2. Ordnung.

Tab. 1: Rechengebiet mit Vibrissenoberflächenmodell und Simulationsparameter

	
Parameter für die Simulation der Vibrissenumströmung bei $Re\ 500$	
Abmessungen des Rechengebiets:	$-10 \leq X/D_h \leq 15$ $-5 \leq Y/D_h \leq 5$ $-0.865\pi \leq Z/D_h \leq 0.865\pi$
Randbedingungen und Netz:	LEFT & RIGHT: slip – Bedingung TOP-BOTTOM: periodisch INLET: $U = \frac{Re \cdot \nu}{D_h}$ OUTLET: konvektive Auslassrandbedingung Element Anzahl: $8 \cdot 10^6$ strukturiertes Gitter mit O-Grid Topologie um die Vibrisse

## Ergebnisse der numerischen Untersuchungen

Im Vorfeld der numerischen Untersuchungen zur Umströmung einer Seehundvibrisse wurde der verwendete Code, die Diskretisierungsverfahren sowie die Netzunabhängigkeit am Referenzfall des unendlich langen Zylinder bei  $Re=500$  getestet. Das erwartete Nachlaufgebiet ist stark dreidimensional und instationär. Erwartet wird sowohl das Auftreten von Primär- als auch Sekundärwirbeln. Die Sekundärwirbel können als Bestandteil des Transitionsprozesses verstanden werden und sollten in der B-Moden Struktur auftreten, welche eine typische Wellenlänge von einem Zylinderdurchmesser aufweist (Brede et al. 1996).

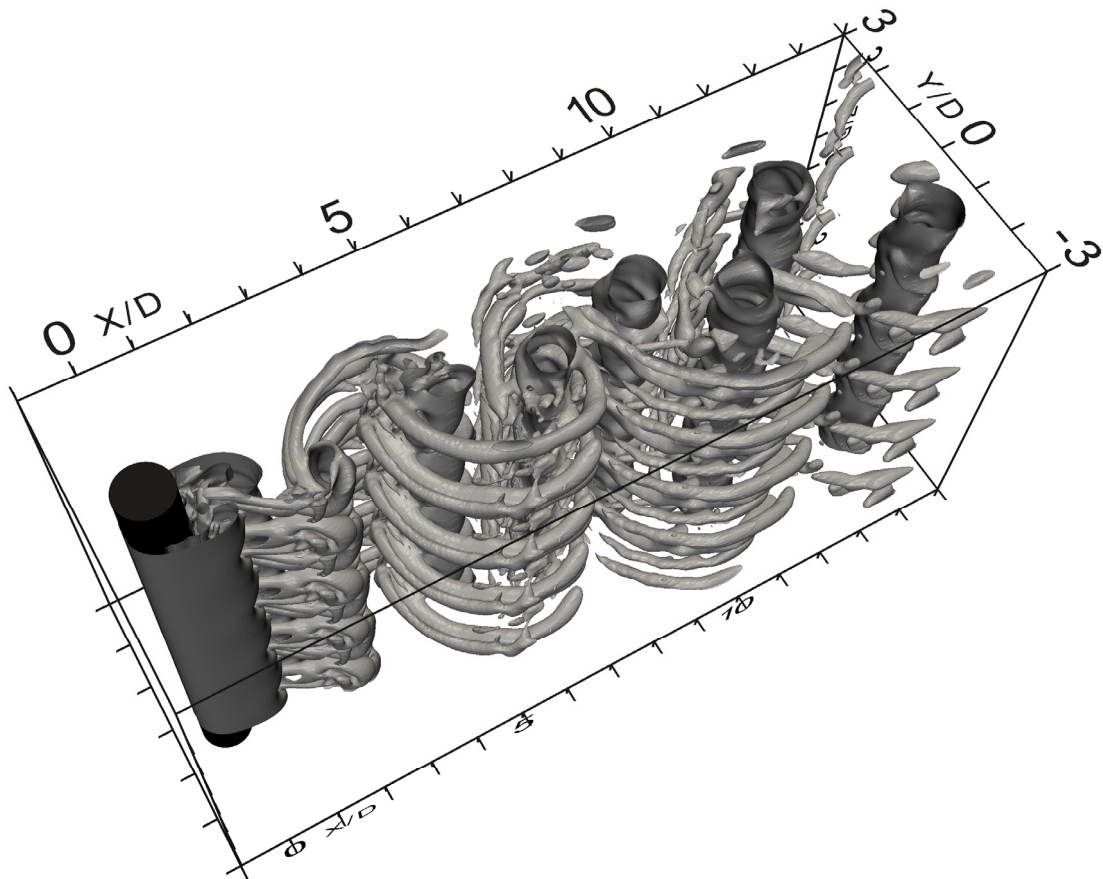


Abb. 5: Unendlich langer Zylinder ( $Re\ 500$ ), numerische Simulation, Darstellung:  $Q(D^2/U^2)=0,53$  (instationär)

Auf der Abbildung 5 sind Isoflächen des  $Q$ -Kriteriums (Jeong, Hussain 1995) zu sehen. Es sind sowohl die Primär- als auch die Sekundärwirbel zu erkennen. Die Primärwirbel resultieren aus dem Aufrollen der seitlichen Scherschichten, die dann alternierend links- und rechtsseitig ablösen. Die Sekundärwirbel stellen die rippenartigen Strömungsstrukturen dar, über die die Primärwirbel schlaufenartig miteinander verbunden sind. Dabei konnte aus den numerischen Daten annähernd die für die Sekundärwirbel typische Wellenlänge von einem Zylinderdurchmesser ermittelt werden. Die grundlegende Strömungstopologie entspricht damit den Literaturangaben (Brede et al. 1996, Balachandar 1997, Williamson 1993, Zdravkovich 1995).

Tab. 2: Ermittelte Strömungsgrößen für die Referenzrechnung unendlich langer Zylinder ( $Re\ 500$ )

Strouhal Zahl	0.216
$\lambda_x \cdot D^{-1}$	3.8
$\lambda_z \cdot D^{-1}$	0.9
$\langle u'u' \rangle / U^2$	0.21
$\langle u'v' \rangle / U^2$	0.13
$\langle v'v' \rangle / U^2$	0.45
$\theta_s^\circ$	102

Betrachtet man die Strömungsstrukturen im Vibrissennachlauf, so stellt man signifikante Unterschiede im Vergleich zum Zylinder fest.



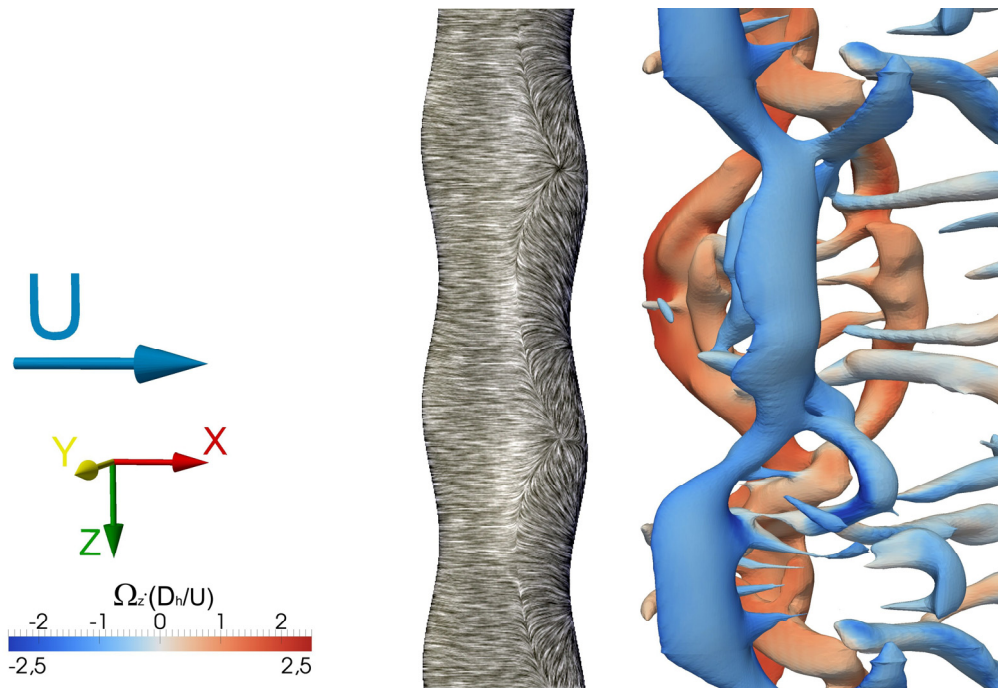


Abb. 6: Vibriresse (Re 500), numerische Simulation, Darstellung:  $Q \cdot (D_h^2/U^2)=0.75$  (instationär) sowie Anstrichbild auf der Vibrissenoberfläche

Zu erkennen ist, dass die Primär- sowie Sekundärwirbelstrukturen, so wie sie im Zylinder-nachlauf auftreten, nicht mehr existent sind (Abb. 6). Dennoch tritt auch hier ein instationäres Wirbelabschwimmen auf, wobei die Produktion der Strukturen im Vergleich zum Zylinder weiter stromab gelegen ist. Als charakteristische Frequenz kann eine Strouhal Zahl von 0.217 angegeben werden, welche annähernd identisch ist zum Fall des geraden Zylinders (Abb. 7).

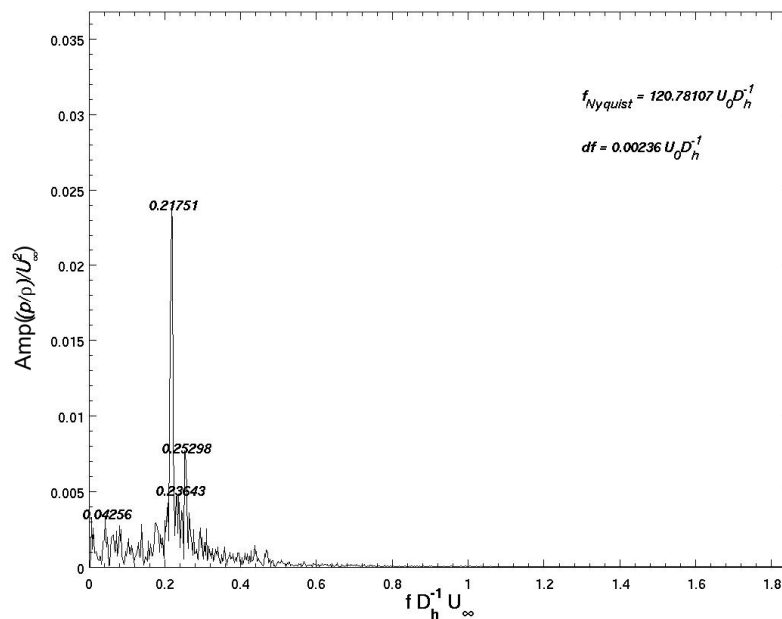
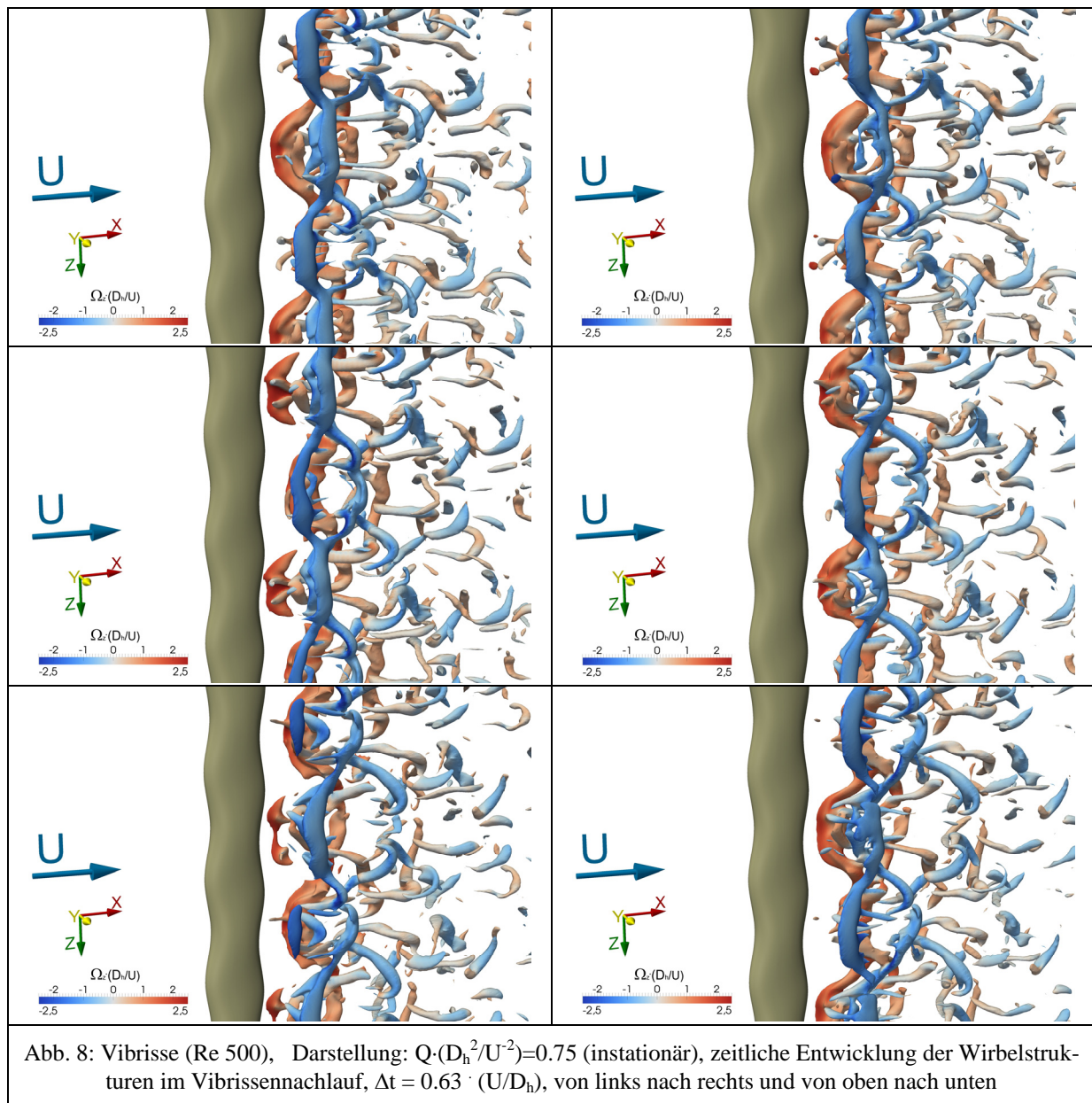


Abb. 7: Amplitudendichtespektrum des zeitlichen Druckverlaufs am Punkt  $x = 2D_h$   $y = 0.5D_h$   $z = 0D_h$

Eine Vorstellung über die Zeitliche Entwicklung geben die folgenden 6 Bilder.



Der Abbildungsserie 8 ist zu entnehmen, dass die Primärwirbel, wie sie am Zylinder zu finden sind, unterdrückt und durch eine komplexe dreidimensionale Wirbelstruktur ersetzt sind. Die Dreidimensionalität der Wirbelstrukturen und die damit verbundene Symmetrie des Druckfeldes sowie die stromab verlagerte Entstehung der Strukturen führt zu einer Verminderung der Fluktuationen des Widerstands- und Auftriebsbeiwerts im Vergleich zum Zylinder. Dies konnte durch eine Auswertung der instationären Schubspannungs- und Druckkräfte nachgewiesen werden.

## Ausblick

Die numerischen Untersuchungen der Nachlaufströmung hinter einer Seehundvibrisse haben gezeigt, dass die komplexe dreidimensionale Oberflächenform der Vibrisse geeignet ist, die normalerweise auftretende Primärwirbelstraße zu zerstören. In den folgenden Arbeiten werden weitere Oberflächenmodelle hinsichtlich ihrer Eignung zur Unterdrückung der Pri-

märwirbelstraße getestet. Weiterführende experimentelle Messungen an Seehundvibrissen sollen die erzielten numerischen Ergebnisse validieren.

## **Dankesworte**

Die bisher erzielten Ergebnisse sind im Rahmen des Schwerpunktprogramms 1207 „Strömungsbeeinflussung in Natur und Technik“ der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) entstanden. Die Autoren möchten sich an dieser Stelle bei der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die finanzielle Unterstützung bedanken, ohne die die Durchführung des Projektes nicht möglich wäre.

## **Literatur**

- Balachandar, S., Mittal, R., Najjar, F. M., 1997: "Properties of the mean recirculation region in the wake of two-dimensional bluff bodies", J. Fluid Mech., 351, pp., 167-1999
- Brede, M., Eckelmann, H., Rockwell, D., 1996: "On secondary vortices in the cylinder wake", Phys. Fluids, 8, pp., 2117-2124
- Dehnhardt, G., Mauck, B., Bleckmann, H., 1998: "Seal whiskers detect water movements", Nature, 394, pp., 235-236
- Jeong, J., Hussain, F., 1995: "On the identification of a vortex", Journal Fluid Mech., 285, pp., 69-94
- Leder, A., 1992: "Abgelöste Strömungen, Physikalische Grundlagen", Vieweg
- Nguyen, N. T., Wereley, S. T., 2002: "Fundamentals and Application of Microfluidics", Artech House, Boston (MA), USA
- Williamson, C. H. K., 1993: "Vortex dynamics in the cylinder wake", Annu. Rev. Fluid Mech., 28, pp., 477-539
- Zdravkovich, M. M., 1995: "Flow around circular Cylinders / Vol.1: Fundamentals", Oxford University Press