

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

### **NUMERICAL STUDY OF THE UNSTEADY FLOW STRUCTURE IN THE WAKE OF A HARBOUR SEAL VIBRISSAE**

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

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

<sup>1</sup>Universität Rostock, Lehrstuhl für Sensorische und Kognitive Ökologie  
Albert-Einstein-Straße 3  
18059 Rostock

Nachlaufströmungen, Biologische Strömungen, Maritime Strömungen, Grobstruktur Simulation  
flow around bluff bodies, wake flows, large eddy simulation, biological flows, passive flow controll

#### **Zusammenfassung**

Im Rahmen des Schwerpunktprogramms 1207 „Strömungen in Natur und Technik“ wird die Umströmung einer Seehundvibrisse untersucht. Die Vibrissen von Seehunden zeichnen sich durch eine komplizierte dreidimensionale Strukturmodellierung aus. Sie versetzen den Seehund in die Lage, Nachlaufspuren von Beutefischen zu detektieren. Mit Hilfe Stereo- $\mu$ Piv Messungen an Seehundvibrissen konnte die stationäre Strömungstopologie des Vibrissennachlaufes ermittelt werden. Zum besseren Verständnis der Funktion der Strukturierung der Vibrisse ist es notwendig, die instationäre Strömungstopologie zu kennen. Durch räumlich und zeitlich hochauflösende numerische Verfahren soll 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 akustische oder visueller Reize beobachtet (Dehnhardt, Muck, Bleckmann 1998).

Die Nachlaufströmung einer Seehundvibrisse gehört zur Klasse der Nachlaufströmungen stumpfer Körper und sollte in weiten Teilen vergleichbar sein mit der eines quer angeströmten langen Kreiszylinders (Brede 1996). Ab einer Reynoldszahl größer 45 kommt es an zylinderförmigen Körpern zur Ausbildung einer primären Instabilität. Die beiden seitlichen Scherschichten lösen wechselseitig periodisch ab (Kármánschen Wirbelstraße). Mit steigender Reynoldszahlen treten neben den Primärwirbeln noch Sekundärwirbel auf, die die zunächst zweidimensionalen und ebenen Primärwirbel dreidimensional verformen. Bei steigen-

der 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: Seehund mit Vibrissen

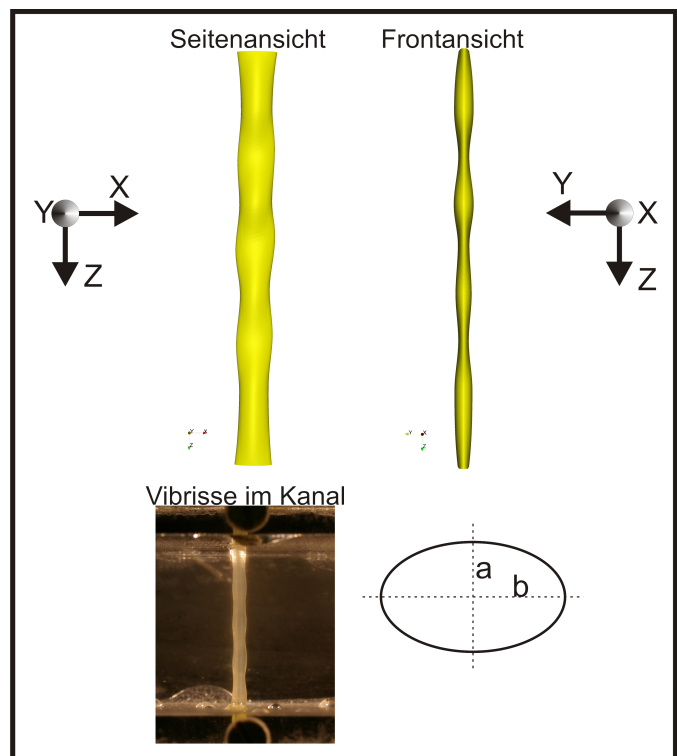
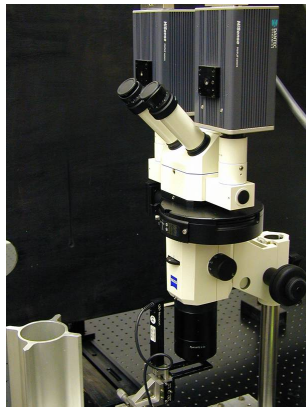


Abb. 2: Geometrie der Seehundvibrisse

Neben einer elliptischen Grundquerschnittsform ist eine ausgeprägte Dickenmodellierung in Vibrissenspannungsrichtung zu erkennen. Durch die Konturierung beider Halbachsen entsteht eine komplexe dreidimensionale Vibrissengeometrie. Die Strukturmodellierung der Vibrissen könnte ein wesentlicher Bestandteil eines Systems für die passive Strömungskontrolle darstellen und zur Unterdrückung oder frühzeitigen Zerstörung der Kármánschen Wirbelstraße beitragen. Die dynamische Kraftwirkung auf die Seehundvibrissen resultiert dann nicht primär aus deren Umströmung, sondern aus der Wechselwirkung mit anderen hydrodynamischen Spuren (Beutetieren). Um die Funktionsweise der Vibrissen als Sensororgan für hydrodynamische Spuren zu verstehen, sind erste Stereo- $\mu$ PIV Messungen an echten Vibrissen durchgeführt worden.

### Experimenteller Aufbau

Für die experimentellen Untersuchungen wurde ein Stereomikroskop mit zwei optischen Wegen und einem Hauptobjektiv verwendet. Als Lichtquelle wurde eine 5W LED verwendet, 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  $60\text{ }\mu\text{m}$  (Nguyen 2002). Die ersten Messungen wurden an einer Vibrisse mit einem mittleren hydraulischen Durchmesser von  $0.75\text{mm}$  und einer Reynoldszahl von 297 durchgeführt. Entlang der Vibrissenlängsachse konnten 13 Ebenen vermessen werden. Der Abstand der Messebenen in  $z$  – Richtung betrug  $0.25\text{mm}$ . Die Abmessungen der  $x$ - $y$  Messebenen betrugen  $1.65\text{mm} \times 2.55\text{mm}$ .



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

**Mikroskop:**  
min. Objektfeld:  
400μmx500μm  
Schärfentiefe: 20μm  
Koaxiale Durchlichtbeleuchtung (5W LED)

**Lineartisch mit Steuerung:**  
Newport M461-XYZ-M  
Max. Verfahrweg [mm]: 12,5  
Min. Schrittweite [μm]: 0.2

Abb. 3: Stereo-μPIV System

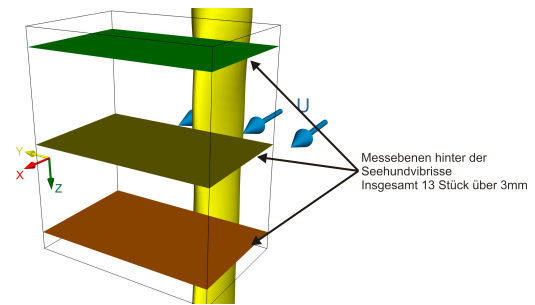


Abb. 4: Messebenen hinter der Seehundvibrisse

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.

## Experimentelle Ergebnisse

Neben dem zeitgemittelten Geschwindigkeits-, Wirbelstärke- und dem Skalarfeld des  $\lambda_2$  Kriteriums konnte auch der vollständige Reynoldssche Spannungstensor bestimmt werden. Aus den instantanen 2D-3C Geschwindigkeitsfeldern ist ein instationäres Wirbelabschwimmen im Nachlauf der Seehundvibrisse gut zu erkennen.

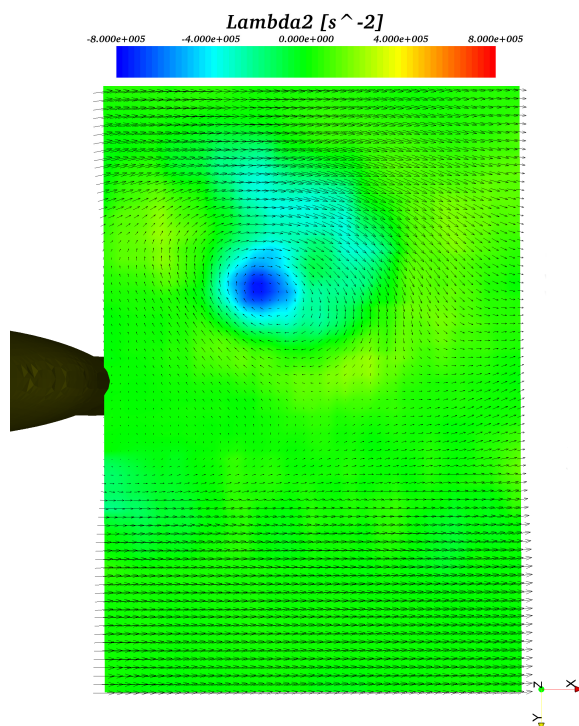


Abb. 5: Instationäres Geschwindigkeitsfeld im Nachlauf der Seehundvibrisse (farbig  $\lambda_2$  Feld)

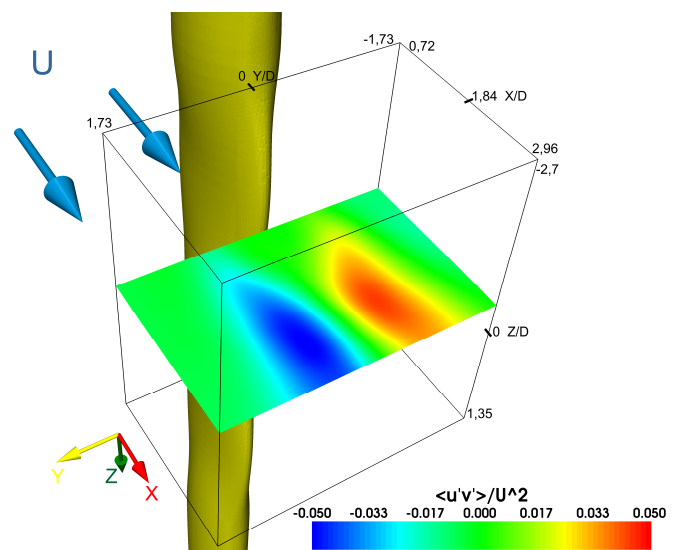


Abb. 6: Reynoldsspannung  $\langle u'v' \rangle / U^2$  Seehundvibrisse

Da die einzelnen Messebenen zeitlich nicht miteinander korrelieren und da aufgrund der geringen Messfrequenz (1Hz) keine Frequenzanalyse möglich war, kann keine Aussage über die räumliche Ausdehnung und zeitliche Abfolge der instantanen Wirbelstrukturen getroffen werden.

	Seehundvibrisse	axiale Scherschichten	zweiseitige Scherschichten
$\left(\overline{u'^2}/U_\infty^2\right)_{\max}$	0,12	0,09	0,23
$\left(\overline{v'^2}/U_\infty^2\right)_{\max}$	0,1	0,09	0,35
$\left(\overline{w'^2}/U_\infty^2\right)_{\max}$	0,13	0,09	0,13
$\left(\overline{u'v'}/U_\infty^2\right)_{\max}$	0,05	0,04	0,11
$\left(\overline{u'w'}/U_\infty^2\right)_{\max}$	0,014	0,04	0,01

**Tabelle 1: Vergleich maximale Reynoldsspannungen im Nachlauf der Seehundvibrisse mit Literaturdaten für axiale und zweiseitige Scherschichtentwicklung (Leder 1992)**

Ein Vergleich der maximalen Amplituden der gemessenen Reynoldsspannungen mit Literaturwerten für axiale und für zweiseitige Scherschichtentwicklung lässt jedoch eine deutliche Ähnlichkeit mit einer axialen Scherschichtentwicklung erkennen. Die Anisotropie in den turbulenten Schubspannungen lässt sich mit der vorhandenen Vorzugsrichtung in Vibrissenspannungsrichtung erklären. Die Ähnlichkeit zur axialen Scherschichtentwicklung ist ein erster Hinweis darauf, dass die Entwicklung der Primärwirbel der Kármánschen Wirbelstraße tatsächlich stark verändert ist.

## Numerische Untersuchungen

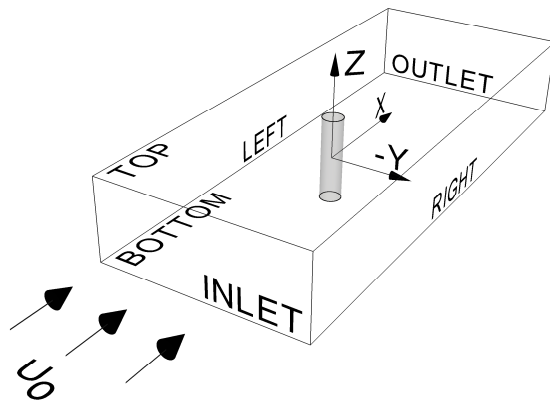
Neben den experimentellen Untersuchungen, aus denen bislang nur zeitgemittelte Volumendensätze rekonstruiert werden konnten, möchte man mit Hilfe von räumlich und zeitlich hochauflösenden numerischen Verfahren Erkenntnisse über die instationäre Strömungstopologie im Nachlauf der Seehundvibrisse gewinnen. Für die Validierung der Numerik können die zeitgemittelten Geschwindigkeitsfelder und Reynoldsspannungsverteilungen genutzt werden. Frequenzanalysen, die mit dem verwendeten Meßsystem bisher noch nicht möglich sind, können dann ergänzenden zu den Messungen aus den numerischen Ergebnissen gewonnen werden. Für die Definition einer Einheitsvibrisse wird ein Ensemble an Seehundvibrissen optisch vermessen. Anschließend wird daraus eine idealisierte Vibrissenform für die numerischen Untersuchungen rekonstruiert.

Bevor die Umströmung der Seehundvibrisse numerisch untersucht wird, wird eine Testrechnung am unendlich langen Kreiszylinder durchgeführt. Bei dieser Testrechnung sollen die numerischen Verfahren darauf abgestimmt werden, eine möglichst hohe Übereinstimmung mit den vorhandenen Literaturdaten zu erzielen. Die gewonnenen Erkenntnisse werden dann bei der Berechnung der Vibrissenumströmung berücksichtigt.

Für die Berechnungen wird die freie Numerikbibliothek openFOAM und für die Gittergenerierung ICEM-CFD verwendet. Die Lösung der Navier-Stokes-Gleichungen erfolgt auf Basis der Finiten Volumen Diskretisierung. Für die geometrische Diskretisierung wurde ein blockstrukturiertes Gitter verwendet. Der nahe Zylinderbereich wurde dabei als O-Gitter ausgeführt und

unter Verwendung hängender Knoten in Zylinderwandrichtung stark verfeinert. Für die Diskretisierung der einzelnen Terme der Navier-Stokes-Gleichungen wurden ausschließlich Verfahren 2. Ordnung verwendet.

#### **Simulationsparameter für den Testfall** **(Re 500 unendlich langer Zylinder)**



#### **Abmessungen des Rechengebietes:**

$$-10 \leq X/D \leq 15$$

$$-5 \leq Y/D \leq 5$$

$$-1 \leq Z/D \leq 1$$

#### **Randbedingungen:**

LEFT & RIGHT: slip – Randbedingung

TOP-BOTTOM: zyklische Randbedingung

INLET: homogene Anströmung

OUTLET: konvektive Abstromrandbedingung

**Abb. 7: Rechengebiet Testfall (Re 500)**

#### **Rechengitter:**

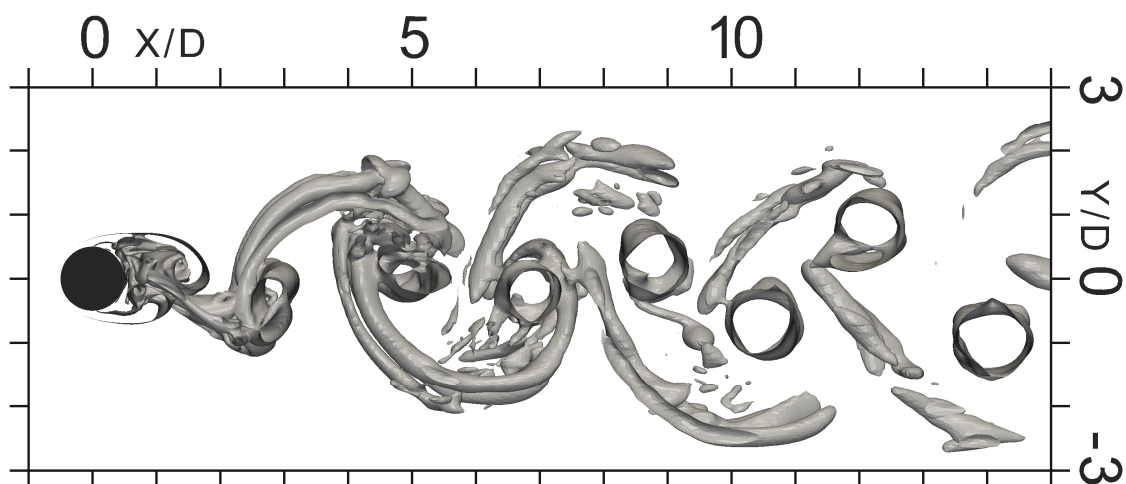
tangentiale Zylinderwandauflösung:  $0,7^\circ$

Auflösung Zylinderspannweite:  $0,04 \cdot D$

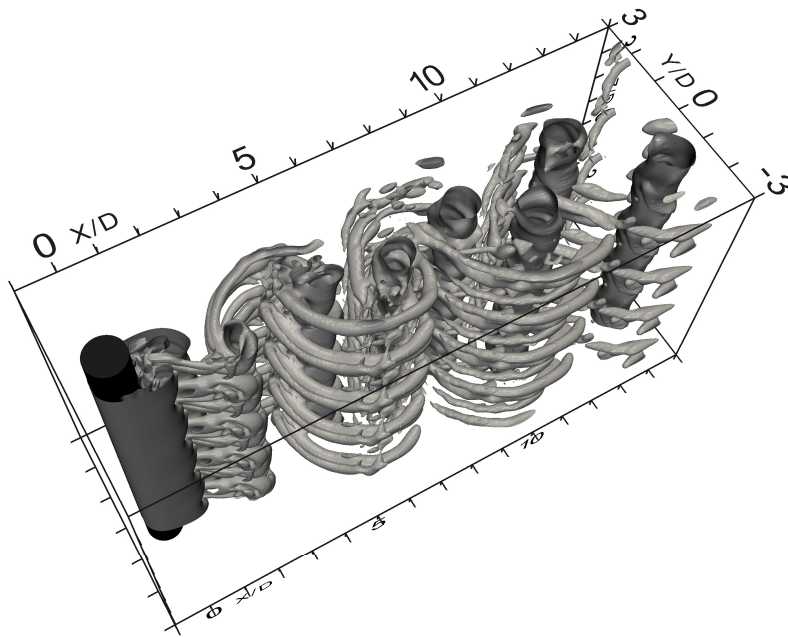
Elementanzahl:  $3,5 \cdot 10^6$

### **Ergebnisse der numerischen Untersuchungen**

Die gewählte Testkonfiguration, unendlich langer Zylinder bei einer Reynoldszahl von 500, bietet sich aufgrund der ausführlichen Literaturdaten sehr gut an, den verwendeten Code hinsichtlich seiner Leistungsfähigkeit zu testen. Das erwartete Nachlaufgebiet ist stark dreidimensional und instationär. Erwartet wird sowohl das Auftreten von Primär- als auch Sekundärwirbel. Die Sekundärwirbel können als Bestandteil des Transitionsprozesses verstanden werden und sollten in der B-Moden Struktur auftreten, die eine typische Wellenlänge von einem Zylinderdurchmesser aufweist (Brede 1996).

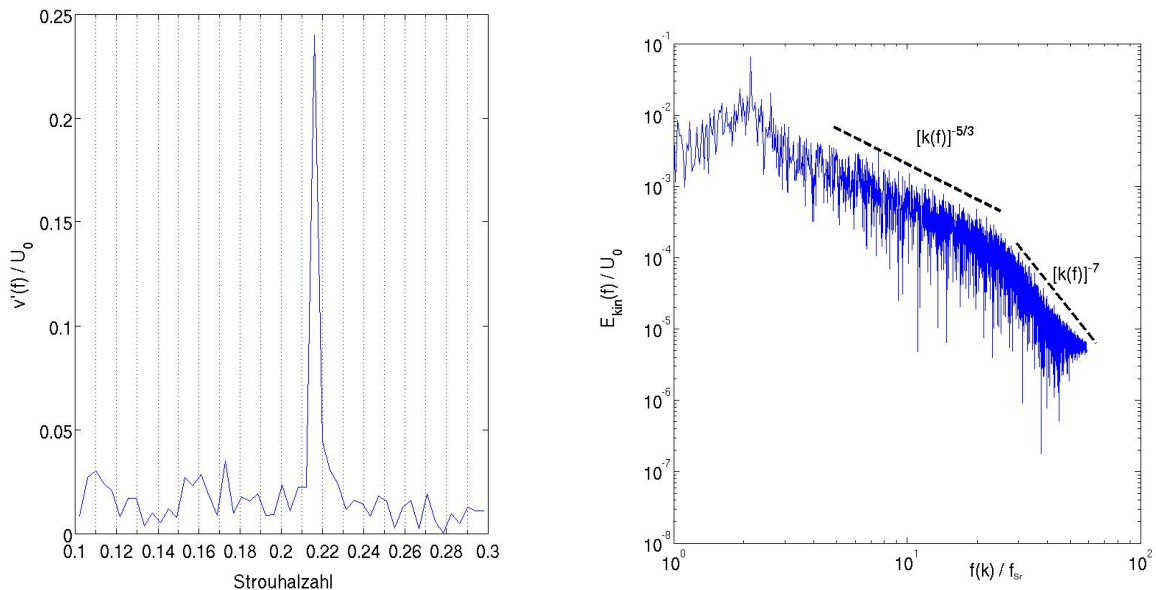


**Abb. 8: Unendlich langer Zylinder (Re 500), Darstellung:  $Q \cdot (D^2 \cdot U^{-2}) = 0,53$  (instationär)**



**Abb. 9: Unendlich langer Zylinder ( $Re = 500$ ), Darstellung:  $Q \cdot (D^2 \cdot U^{-2}) = 0,53$  (instationär)**

Auf den Abbildungen 8 und 9 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 Strukturen 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 in der Literatur gemachten Angaben. Hinsichtlich des dynamischen Verhaltens der Strömung und der erzielten räumlichen Auflösung werden Frequenz- und Energiespektren herangezogen.



**Abb. 10: Frequenzspektrum der  $v$ -Komponente (Position  $X/D=1,0$ ;  $Y/D=0,5$ ;  $Z/D=0,0$ )**

**Energiespektrum (Position  $X/D=1,0$ ;  $Y/D=0,5$ ;  $Z/D=0,0$ )**

Die ermittelte Strouhalzahl von 0,216 stimmt gut mit den in der Literatur gegebenen Werten überein (Zhang, Noack, Eckelmann 1994; Roshko 1954). Das in doppeltlogarithmische Form aufgetragene Energiespektrum zeigt alle typischen Bereiche. Die räumliche Auflösung reicht dabei aus, um sowohl den Trägheitsbereich mit  $[k(f)]^{-5/3}$ , als auch den von Heisenberg postulierten Dissipationsbereich mit einem Geradenabfall von  $[k(f)]^{-7}$  aufzulösen.

Neben den experimentell ermittelten Geschwindigkeitsfeldern und daraus abgeleiteten Größen, geben vor allem die Verteilungen der Reynoldsspannungen Hinweise auf eine mögliche, durch die Vibrissenstrukturierung verursachte, Störung der Primärwirbelstraße. Die Verteilungen der Reynoldsspannungen können auch aus den instationären Rechnungen gewonnen werden.

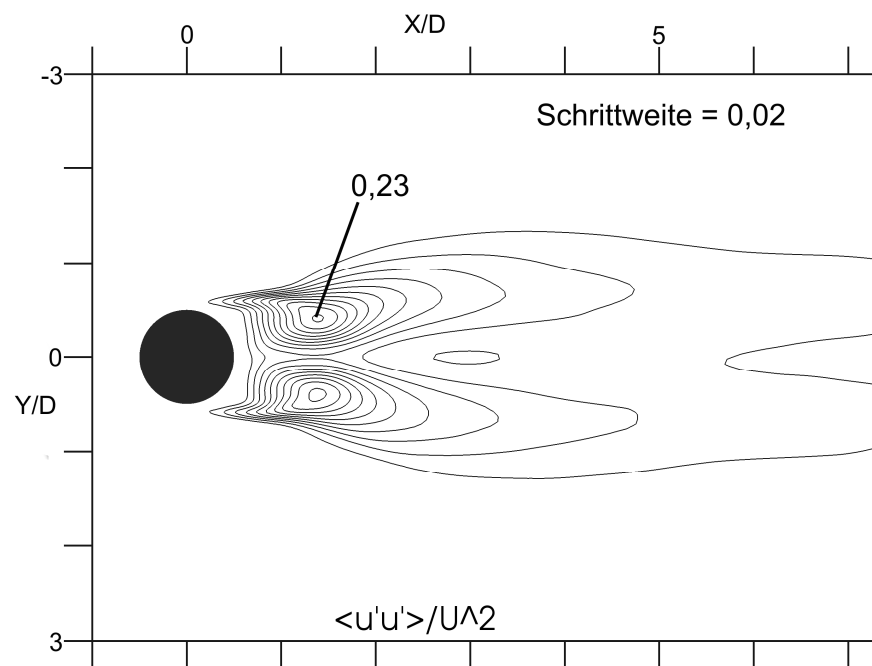


Abb. 11 Unendlich langer Zylinder ( $Re\ 500$ ), Darstellung: Reynoldsspannung  $\langle u'u' \rangle / U^2$

Die in Abbildung 11 dargestellte Verteilung der turbulenten Normalspannung  $\langle u'u' \rangle / U^2$ , zeigt die erwartete Verteilung mit den beiden Maxima im Bereich der Tangentialflächen bei  $Y = \pm 0,5 \cdot D$ . Die absoluten Werte stimmen dabei mit den Literaturwerten überein (Leder 1992). Hinsichtlich der anderen Normalspannungskomponenten werden ähnlich gute Übereinstimmungen erzielt. Allerdings zeigen gerade die turbulenten Schubspannungen, dass für eine vollständig auskonvergierte Statistik mehr Zeitschritte benötigt werden. Abschließend bleibt festzuhalten, dass die numerischen Simulationen bereits in diesem frühen Stadium gute Übereinstimmungen mit den in der Literatur gegebenen Daten liefern.

## Ausblick

Für die Ermittlung der instationären Strömungstopologie im Nachlauf einer Seehundvibrisse sind erste Testrechnungen am unendlich langen Zylinder ( $Re\ 500$ ) durchgeführt worden. Diese Rechnungen dienen dazu, den verwendeten Code hinsichtlich seiner Leistungsfähigkeit zu überprüfen. Die erzielten Ergebnisse stimmen dabei in wesentlichen Teilen gut mit den Angaben aus der Literatur überein. In der nächsten Phase wird ein Ensemble an Seehundvibrissen vermessen um eine idealisierte Vibrissengeometrie für die anschließende Simulationsrechnung zu generieren. Aus den numerischen Ergebnissen sollen nun mittels nie-



derdimensionaler Modenzerlegung Erkenntnisse zur instationären Strömungstopologie gewonnen werden. Weiterführende experimentelle Untersuchungen an Seehundvibrissen werden dazu dienen, die numerisch gewonnenen Daten zu 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**

- Dehnhardt, G., Mauck, B. and Bleckmann, H. (1998) Seal whiskers detect water movements. *Nature* 394: 235-236
- Brede, M (1996) Dreidimensionale Wirbelstrukturen im Zylindernachlauf beim laminar-turbulenten Übergang im Reynoldszahlbereich 160 bis 500, Max-Planck-Institut für Strömungsforschung, Göttingen, Deutschland
- Nguyen, N. T., Wereley, S. T. (2002), *Fundamentals and Application of Microfluidics*, Artech House, Boston (MA), USA
- Leder, A. (1992) *Abgelöste Strömungen, Physikalische Grundlagen*. Vieweg, Braunschweig
- Jeong, J., Hussain, F. (1995), On the identification of a vortex, *Journal Fluid Mech.*, 285, 69-94
- Zhang, H. Q., Noack B. R., Eckleermann H., (1994), *Numerical Computation of the 3-D Cylinder Wake*, Max-Planck-Institut für Strömungsforschung, Göttingen, Deutschland
- Roshko, A. (1954), On the development of turbulent wakes from vortex streets, *NACA Report* 1191