

STRÖMUNGSMCHANISCHE UNTERSUCHUNGEN IM NACHLAUF EINES VIBRISSENMODELLS BEI HOHEN REYNOLDSZAHLEN

HYDRODYNAMIC STUDIES IN THE WAKE OF A MODEL VIBRISSA AT HIGH REYNOLDS NUMBER

T. Birkner, M. Witte, M. Brede, A. Leder

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

Nachlaufströmung, LDA, Ablösung, Widerstandsminderung, Wirbelunterdrückung
bluff body flows, wake, passive flow control, VIV, drag reduction, LDA

Zusammenfassung

Der Seehund besitzt die einzigartige Fähigkeit, Beutefische ohne optische oder akustische Reize aufzuspüren. Er nutzt seine Barthaare, die sogenannten Vibrissen, um die von bewegten Beutetieren erzeugten Wirbelstrukturen aufzuspüren und zu verfolgen (Dehnhardt et al. 1998). Im Laufe seiner evolutionären Entwicklung bildete sich eine bisher einmalige, dreidimensionale Geometrie der Vibrissen aus, die dazu führt, dass sich bei der Eigenbewegung des Seehundes keine wirbelinduzierten Schwingungen des einzelnen Barthaars ausbilden. Im Ergebnis sind die Vibrissen sehr empfindlich gegenüber Wasserverwirbelungen und ermöglichen es dem Seehund hydrodynamische Spuren zu detektieren, die älter sind als eine Minute (Dehnhardt et al. 2001).

In diesem Beitrag werden nun Untersuchungen des dreidimensionalen Nachlaufs eines Vibrissenmodells in vergrößertem Maßstab bei einer Reynoldszahl von $Re=10^4$ bezüglich des mittleren hydraulischen Durchmessers vorgestellt. Die experimentellen Untersuchungen wurden im Windkanal mit der drei Komponenten Laser Doppler Anemometrie (3C LDA) durchgeführt.

Einleitung

Die Nachlaufströmung stumpfer Körper ist stark von Ablösungsphänomenen geprägt. Es treten am Zylinder ab einer Reynoldszahl von ca. 45 primäre Instabilitäten auf, die sich mit steigender Reynoldszahl zu wechselseitig ablösenden Wirbeln entwickeln, welche im Nachlauf eine sogenannte Kármánsche Wirbelstraße ausbilden (Zdravkovich 1997). Diese wechselseitig ablösenden Wirbel führen zu sich periodisch ändernden Druckverteilungen am Zylinder und somit zu periodischen Auftriebskräften die den Körper in Schwingung versetzen können. Die Schwingungserregung wird als wirbelinduzierte Schwingung bezeichnet.

Dieses Phänomen stellt für umströmte lange stumpfe Körper wie zum Beispiel Schornsteine, Windräder, Hochhäuser und Offshore- Anlagen ein erhebliches Problem dar, da es im Resonanzfall zu strukturellem Versagen kommen kann.

Experimentelle und numerische Strömungsuntersuchungen an der Seehundvibrisse im Originalmaßstab und bei kleinen Reynoldszahlen zeigen, dass im Nachlauf dieser Struktur keine ausgebildete Kármánsche Wirbelstraße zu finden ist, die eine Schwingung induzieren könnte (Witte et al, 2009). Neben der Unterdrückung der wirbelinduzierten Schwingungen konnte außerdem festgestellt werden, dass der Strömungswiderstand dieser Vibrissenstruktur um ca. 40% niedriger ist als bei einer vergleichbaren Zylindergeometrie (Hanke et al, 2010).

Um die wirbelunterdrückenden und widerstandsmindernden Eigenschaften der Vibrissengeometrie zu identifizieren und in die Technik zu übertragen, wurden mit der Laser Doppler Anemometrie (LDA) zeitgemittelte Nachlaufuntersuchungen bei hohen Reynoldszahlen durchgeführt.

Experimenteller Aufbau

Gegenstand der Untersuchungen ist ein maßstabsgetreues Modell einer Seehundvibrisse mit einem Vergrößerungsmaßstab von 22:1. Die Geometrie der Seehundvibrisse zeigt eine wellige Oberflächenkontur, bei der sich der elliptische Querschnitt periodisch entlang der Querschnittsachse ändert (Abb.1). Aus dieser Geometrie ergibt sich für das Modell ein mittlerer, hydraulischer Durchmesser $D_{h,m}$ von 30,33 mm und ein Modulationsabstand M von 40,24 mm.

$$D_h = \frac{4 * A}{U} \qquad \frac{M}{D_{h,m}} = 1,33$$

Entlang der Längsachse wurden 8 Messebenen mit jeweils 1953 Messpunkten pro Ebene vermessen. Der Abstand der Messebenen in z-Richtung beträgt $\Delta z \approx 10$ mm. Die Ebenen haben eine Größe in x-y-Richtung von 124 x 60 mm². Abbildung 2 zeigt die Lage von vier ausgewählten Messebenen, die im weiteren Verlauf die Strömungstopologie verdeutlichen sollen.

Die Untersuchungen der Nachlaufstrukturen erfolgten in einem Windkanal Göttinger Bauart mit einer offener Messstrecke mit rechteckigem Querschnitt (0,65x0,65m²). Die Strömung weist eine Anströmgeschwindigkeit U_∞ von 5 m/s und einen Turbulenzgrad T_U von $\approx 0,5\%$ auf. Dadurch ergibt sich eine Reynoldszahl von $Re=10^4$ bezüglich des mittleren, hydraulischen Durchmessers $D_{h,m}$. Um den Einfluss von Kopfwirbeln auf das Nachlaufgebiet zu unterbinden, wurde das Modell am oberen und unteren Ende mit Endscheiben versehen (Abb.3).

Im Rahmen der experimentellen Arbeiten wurde ein drei Komponenten LDA- System verwendet. Dieses System besteht aus einer Zweikomponenten-Optik mit einem 500mW Argon-Ionen Laser mit Wellenlängen von 514nm und 488nm und einer Einkomponenten-Optik mit einem frequenzverdoppeltem NdYAG-Laser mit einer Wellenlänge von 532nm.

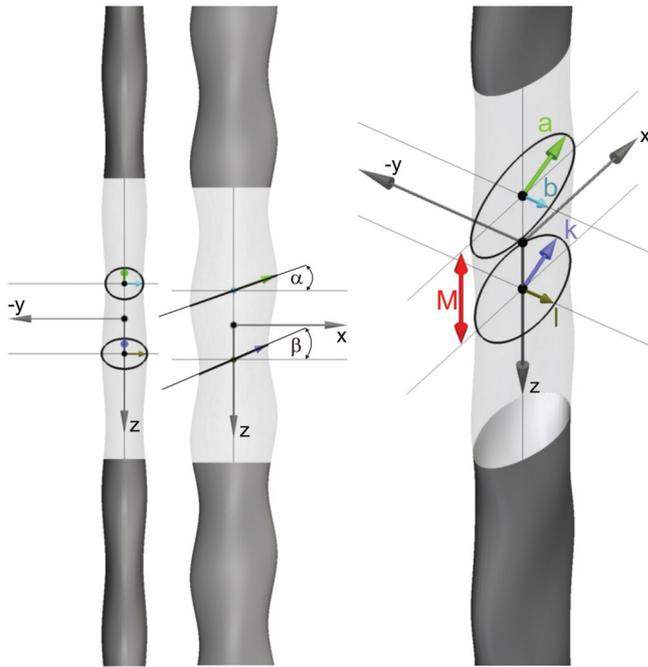


Abb. 1: Geometrie des Vibrissenmodells

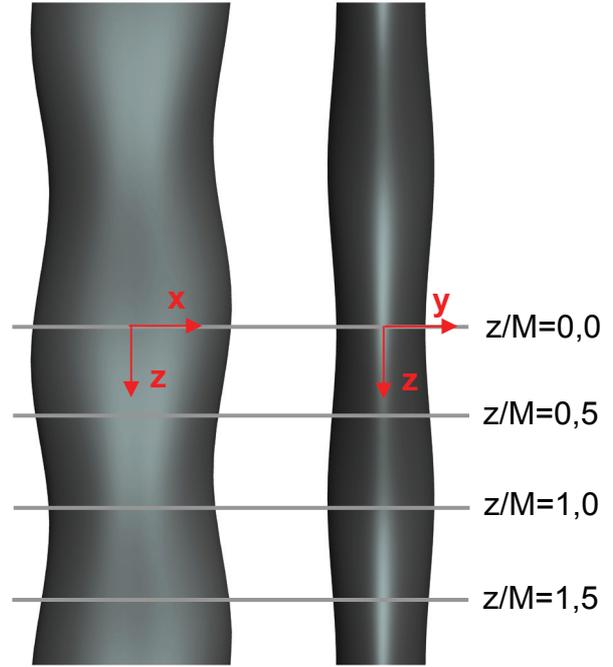


Abb. 2: Lage ausgewählter Messebenen

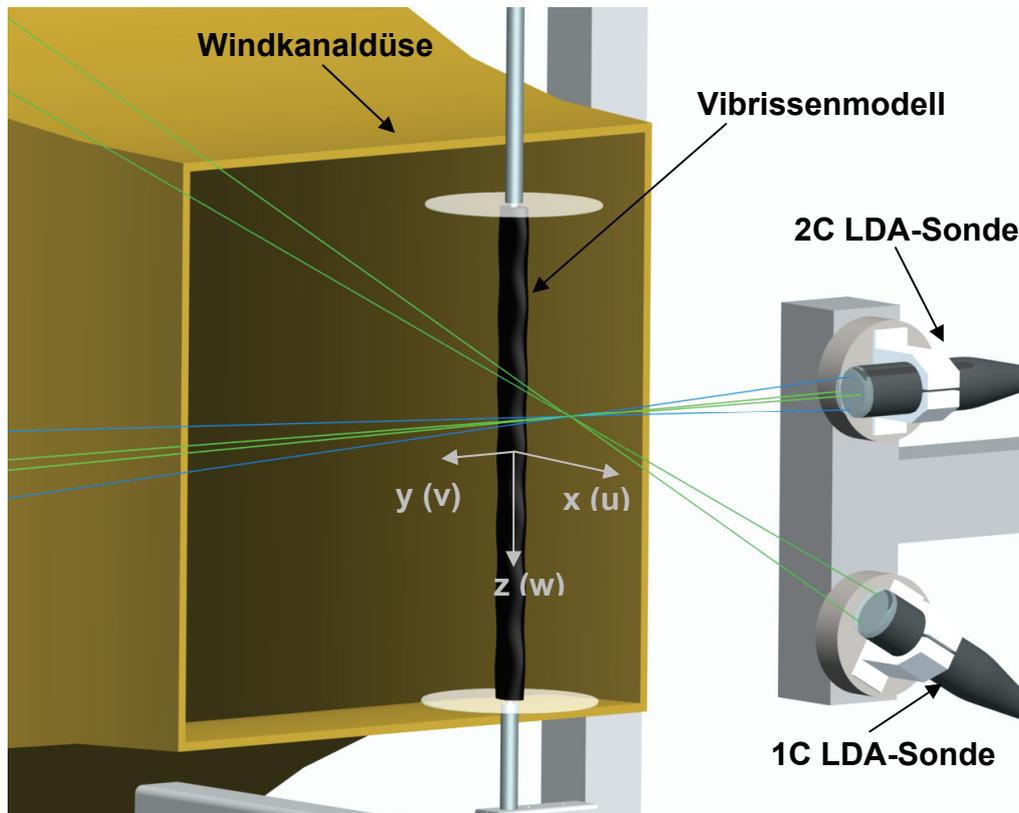


Abb. 3: Schematische Darstellung des experimentellen Versuchsaufbaus des 3C-LDA- Systems

Ergebnisse

Die Ergebnisse der Messungen zeigen im Unterschied zur Zylinderumströmung ein stark dreidimensionales Nachlaufgebiet. In Abb. 4 ist die Geschwindigkeitsverteilung der Hauptströmungskomponente von vier ausgewählten Messebenen (vgl. Abb.2) dargestellt. Abbildung 4.a) stellt die Messebene dar, in der die Vibrissengeometrie einen schlanken Ellipsenquerschnitt aufweist und c) zeigt die Ergebnisse im Bereich des gedrunenen Ellipsenquerschnitts. Die anderen beiden Ebenen zeigen Ergebnisse der Mittelbereiche zwischen diesen beiden Querschnittsmaxima. Betrachtet man diese Ergebnisse, so lassen sich zwischen den dargestellten Ebenen deutliche Unterschiede erkennen. Während die Ebenen b) und c) sehr ähnliche Strömungscharakteristiken mit relativ großem Rezirkulationsgebiet aufweisen, so unterscheiden sich die Nachlaufströmungen der anderen dargestellten Ebenen sehr deutlich. Besonders auffällig ist dabei, dass das Rezirkulationsgebiet in diesen Bereichen von der Körperkontur abgelöst ist.

Diese dreidimensionale Strömungstopologie wird zusätzlich in Abb.5a) und b) verdeutlicht. In der Darstellung a) ist die Begrenzung des Rezirkulationsgebietes als ISO-Fläche dargestellt. Des Weiteren sind in b) Stromlinien dargestellt, die den Verlauf der Strömung im Außenbereich (blau) und die Rezirkulation (gelb) verdeutlichen. Die roten Stromlinien zeigen die Strömungstopologie direkt hinter der Körperkontur im Bereich des Rezirkulationsgebietes. Es ist deutlich zu erkennen, dass sich in diesem Bereich direkt hinter der Körpergeometrie stationäre Sekundärwirbel bilden.

Sowohl die Größe des Totwassers als auch die Tatsache, dass es Bereiche gibt, in denen das Totwasser von der Körpergeometrie ablöst, lassen den Schluss zu, dass der statische Druck hinter dem Vibrissenmodell höher ist, als bei einer vergleichbaren Zylindergeometrie, wodurch der Widerstandsbeiwert der Vibrissenstruktur niedriger ist, als bei einer Zylinderumströmung.

Betrachtet man die normierte turbulente kinetische Energie (k/U_∞^2), die in Abb. 6 in den vier Ebenen dargestellt ist, so zeigen sich ebenfalls Unterschiede zwischen den einzelnen Ebenen. So sind die Maxima der turbulenten kinetischen Energie im Bereich des abgelösten Totwassers, also im Bereich mit schlankem Ellipsenquerschnitt zu finden. In den Bereichen in denen der Querschnitt etwas größere Querausdehnungen hat, ist der Nachlauf eher von Scherschichtinstabilitäten geprägt. Dies lässt darauf schließen, dass sich in diesen Bereichen keine ausgeprägten Primärwirbelsysteme bilden, die zu einer Schwingungsanregung quer zur Strömungsrichtung führen könnten.

Zusätzlich ist der Betrag der Maximalwerte der normierten turbulenten kinetischen Energie mit $k/U_\infty^2 \approx 0,20$ deutlich niedriger als bei einem vergleichbaren Zylinder mit $k/U_\infty^2 \approx 0,35$ (Brede, 2001), so dass davon auszugehen ist, dass der Nachlauf eher durch kleinskalige Turbulenzerscheinungen geprägt ist, was wiederum die Vorstellung der Wirbelunterdrückung durch die Vibrissengeometrie stützt.

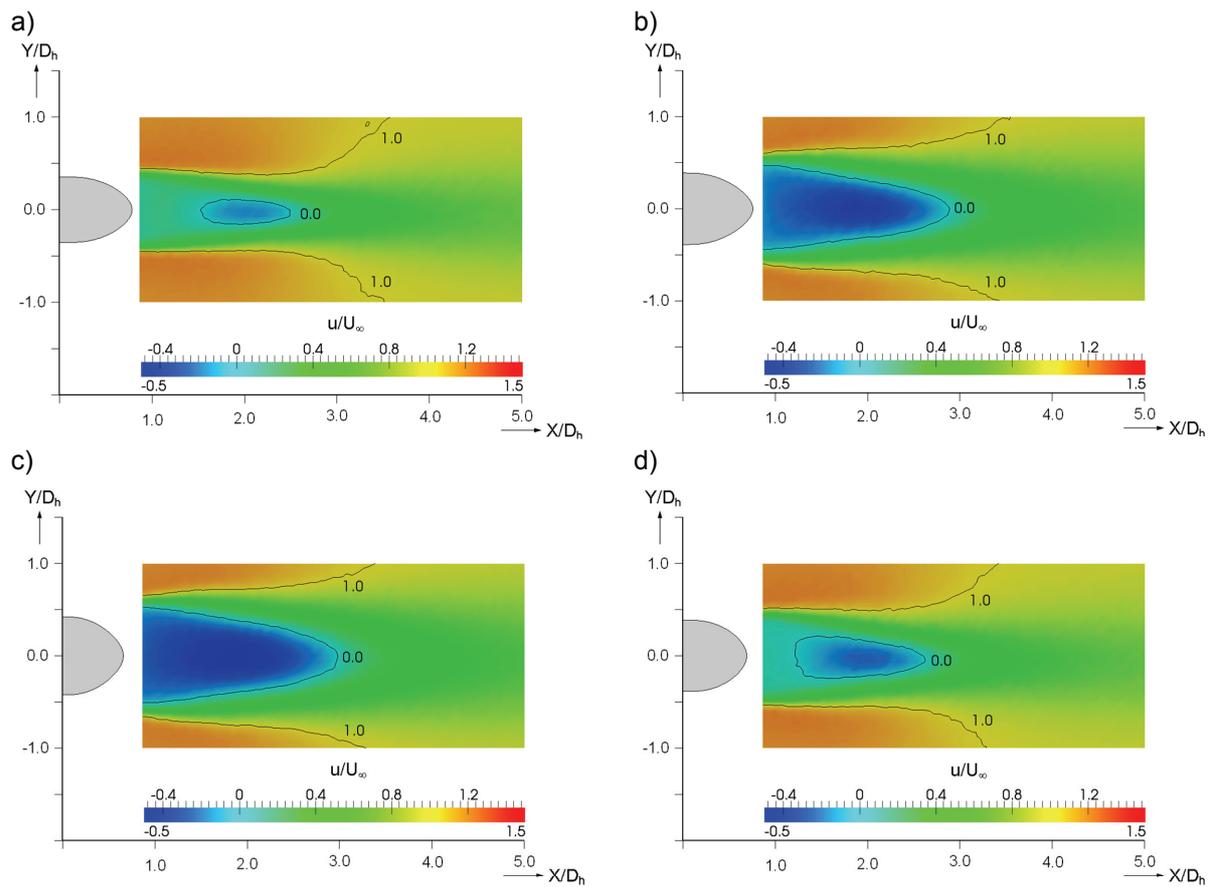


Abb.4: zeitgemittelte Geschwindigkeitsverteilung der Hauptströmungsrichtung u/U_∞ bei a) $z/M=0,0$; b) $z/M=0,5$; c) $z/M=1,0$ und d) $z/M=1,5$

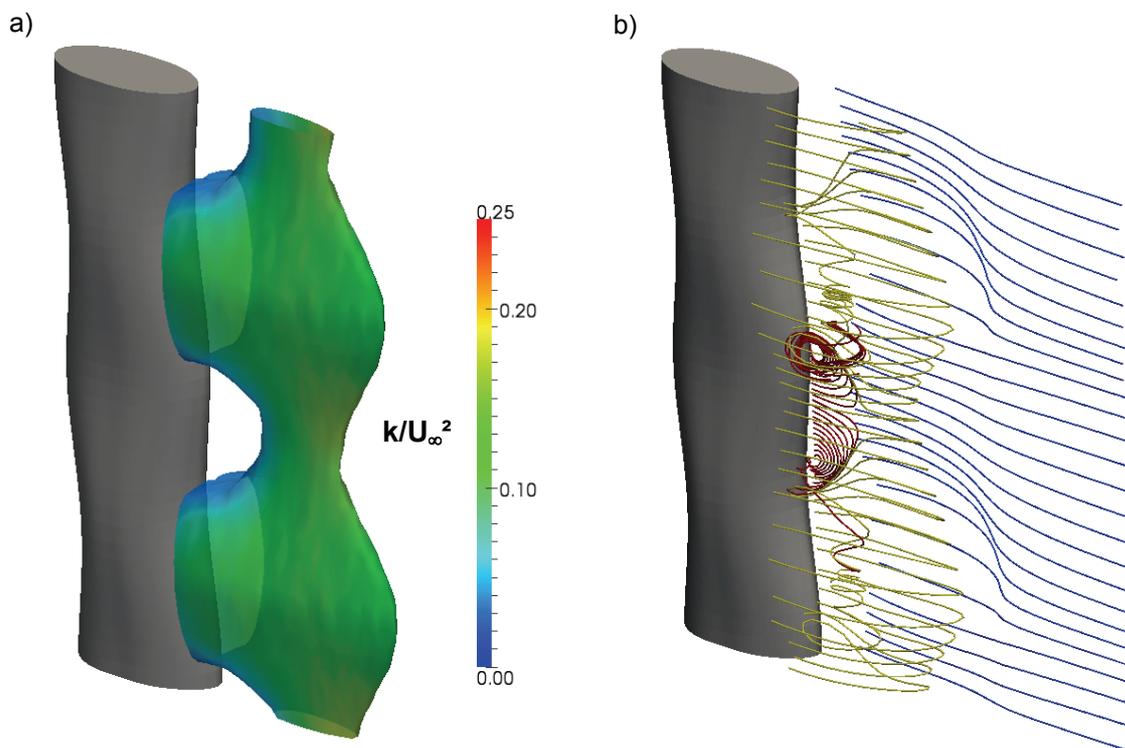


Abb.5: zeitgemittelte Strömungstopologie a) ISO-Fläche zeigt die Begrenzung des Rezirkulationsgebiet ($u/U_\infty=0$) mit Farbverteilung k/U_∞^2 ; b) Stromlinien: Farbe der Stromlinien zeigt unterschiedliche Strömungsbereiche

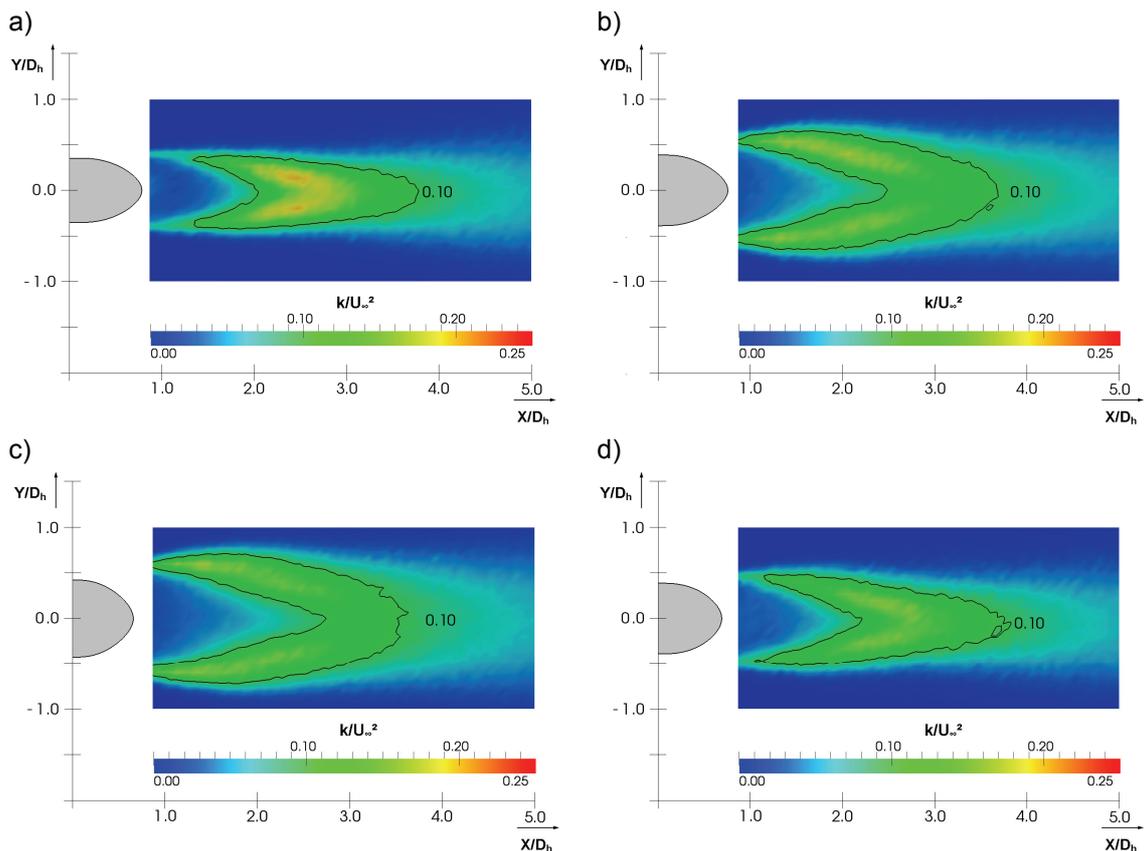


Abb.6: zeitgemittelte Darstellung der turbulenten kinetischen Energie (k/U_∞^2) bei a) $z/M=0,0$; b) $z/M=0,5$; c) $z/M=1,0$ und d) $z/M=1,5$

Zusammenfassung

Es wurden zeitgemittelte LDA-Messungen im Nachlauf eines Modells mit Vibrissengeometrie durchgeführt. Es sind entlang der Körperlängsachse 8 Ebenen gemessen worden, die zu einem Messvolumen zusammengefügt wurden.

Die Ergebnisse dieser Messungen zeigen die deutliche Dreidimensionalität der Strömungstopologie. Zusätzlich konnten turbulente kinetische Energien gemessen werden, die wesentlich geringer sind als bei einer vergleichbaren Zylindergeometrie.

Diese Ergebnisse lassen vermuten, dass auch an einem großskaligen Vibrissenmodell bei einer Reynoldszahl von 10^4 sowohl die Ausbildung primärer Wirbelsystem unterdrückt, als auch der Strömungswiderstand durch die Körpergeometrie gemindert wird.

Danksagung

Die Autoren danken Herrn Grebin vom Lehrstuhl Strömungsmechanik der Universität Rostock für die tatkräftige Unterstützung bei der Durchführung der Messungen. Besonderer Dank gilt außerdem der interdisziplinären Stipendiatenförderung der Universität Rostock für die Förderung dieses Projektes.

Literatur

- M. Brede, A. Leder (2001) - Bestimmung der Bilanz der turbulenten kinetischen Energie mit Hilfe der phasengemittelten 3D-Laser-Doppler Anemometrie im transitionellen Zylindernachlauf in: Zhang, Zh.; Ruck, B.; Leder, A.; Dopheide, D. (Hrsg.) Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik - 9. Fachtagung der GALA e.V. 2001, Shaker Verlag, Aachen
- Dehnhardt, G., Mauck, B. and Bleckmann, H. (1998). Seal whiskers detect water movements. *Nature* 394, 235-236.
- Dehnhardt, G., Mauck, B., Hanke, W. and Bleckmann, H. (2001): Hydrodynamic trail-following in Harbor seals (*Phoca vitulina*). *Science* 193, 102-104
- Hanke, W.; Witte, M.; Miersch, L.; Brede, M.; Oeffner, J.; Michael, M.; Hanke, F.; Leder, A.; and Dehnhardt, G. (2010): Harbor seal vibrissa morphology suppresses vortex induced vibrations. zur Veröffentlichung eingereicht bei *Journal of Experimental Biology*, 2010
- Witte, M.; Michael, M.; Brede, M.; Leder, A. (2009): Untersuchungen der instationären Strömungstopologie im Nachlauf einer Seehundvibrisse „Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik“ -17. Fachtagung der GALA e. V.
- Zdravkovich, M.M. (1997) - Flow around circular cylinders Vol.1: Fundamentals; *Oxford Univ. Press*,