

BEEINFLUSSUNG VON TRANSITION UND TURBULENZ IM NACHLAUF STUMPFER KÖRPER DURCH EINE DREIDIMENSIONALE FORMGEBUNG AM BEISPIEL DER SEEHUNDVIBRISSE

MODIFICATION OF THE TRANSITION AND THE TURBULENCE IN THE WAKE OF BLUFF BODIES BY THREEDIMENSIONAL SHAPING – THE WAKE OF THE VIBRISSA OF A SEAL

M. Brede, M. Witte, W. Hanke¹, L. Miersch¹, G. Dehnhardt¹ und A. Leder

Universität Rostock, Lehrstuhl Strömungsmechanik, Albert-Einstein-Str. 2, 18059 Rostock

¹Universität Rostock, Lehrstuhl Sensorische und Kognitive Ökologie, A.-Einstein-Str.3, 18059 Rostock

Nachlauf stumpfer Körper, Transition, Bionik
bluff body wake, transition, biomimetics

Zusammenfassung

In Verhaltensexperimenten mit Seehunden konnte vor einigen Jahren gezeigt werden, dass die Barthaare von Seehunden, die Vibrissen, dem Tier außergewöhnliche Fähigkeiten ermöglichen. Wird das Schwingungsverhalten der einzelnen Vibrisse im Labor betrachtet, fällt auf, dass im Vergleich zum Kreiszyylinder die wirbelinduzierten Schwingungen stark reduziert sind. Somit wird es dem Seehund ermöglicht, auch schwache Wirbelsignaturen von Beutefischen im Wasser anhand der ausgelösten Vibrissenschwingung wahrzunehmen (Hanke et al. 2010).

Ausgehend von der experimentellen Untersuchung des Strömungsfeldes an einer Seehundvibrisse mit Stereo- μ PIV und den Ergebnissen der numerischen Simulation wird gezeigt, in welcher Weise die dreidimensionale Form der Struktur die Wirbelbildung beeinflusst und wie dadurch eine Verringerung von dynamischen Kräften und Strömungswiderstand an der Vibrisse im Vergleich zum Zylinder erreicht wird.

Einleitung

Biologische Organismen können durch selektive Prozesse im Laufe der Evolution mitunter spezielle Strömungsphänomene so nutzen, dass erstaunliche sensorische oder motorische Leistungen vollbracht werden. Seehunde können allein mit Hilfe ihres Vibrissenapparates hydrodynamische Spuren im Wasser wahrnehmen. Im Experiment (Dehnhardt, Mauck, Bleckmann 1998) konnte gezeigt werden, dass Seehunde, denen man die Augen verdeckt und das Hör- und Geruchsempfinden blockiert, weiterhin sehr schnell und genau einem motorisch angetriebenen Fischmodell folgen können. In Laborexperimenten wurde daraufhin die Mechanik der Vibrisse einzeln untersucht, mit dem Ergebnis, dass an der Seehundvibrisse, im Gegensatz zu anderen zylinder- oder ellipsoidförmigen Barthaaren, keine Schwingungen gemessen werden, die üblicherweise von der Ablösung einer Wirbelstraße herrühren würden. Gleichzeitig zeigt die Seehundvibrisse eine einmalige dreidimensionale Form, bei der es zur sinusoidalen Variation des Durchmessers mit der Achsenrichtung kommt.

Die Seehundvibrisse verdient somit besondere Aufmerksamkeit, da sie erstmals ein Strömungsobjekt darstellt, bei dem auf dem Wege des Evolutionsprozesses der Natur die Wirbelstraßenbildung unterdrückt wurde. Es kann davon ausgegangen werden, dass ein biolo-

gisches System, das dem Tier zum Nahrungserwerb dient, in Millionen von Jahren hoch optimiert ist. Den Ingenieuren stand jedoch nicht so viel Zeit zur Verfügung, so dass beispielsweise die Scruton-Spirale (Scruton 1965) bis heute keiner vergleichbaren Optimierung unterworfen wurde. Aus diesem Grund ist es lohnend zu untersuchen, welche genaue Form die Vibrisse aufweist und welche Wirbelstrukturen im Unterschied zum bisher eingeführten Wirbelmodell im Nachlauf eines Zylinders auftreten. Damit kann die Vibrisse zukünftig zum Modell für bionische Entwicklungen zur Unterdrückung der Wirbelstraße an technischen umströmten stumpfen Körpern werden.

Lösungen zur passiven Beeinflussung von Wirbelstraßen

Verschiedene technische Strukturen wurden bereits vorgeschlagen, um die Wirbelstraße hinter quer angeströmten zylinderförmigen Körpern passiv zu beeinflussen. Am bekanntesten wurde eine der ältesten Versuche, die bereits erwähnte Scruton-Spirale. Hierbei handelt es sich um eine spiralförmige Wendel, die um einen ansonsten zylindrischen langgestreckten Körper gelegt ist. Scruton fand durch systematische Variation eine Reduktion der dynamischen Kräfte, allerdings auch eine Erhöhung des Strömungswiderstandes. Aufgrund des großen Interesses der Maritimen Industrie, die bestrebt ist, die Lasten auf die Fundamente von Meeresplattformen zu minimieren, wurden weitere Untersuchungen durchgeführt, aus denen sich vier Arten von quer angeströmten Strömungskörpern ergaben, die sowohl zu einer Verringerung der dynamischen Kräfte, als auch zu einer Reduktion des Widerstandes geführt haben.

Dies sind insbesondere: a) Zylinder mit dem Querschnitt einer Halb-Ellipse und welligen Hinterkanten (Tombazis and Bearman, 1997), b) Zylinder mit rechteckigem Querschnitt mit welligen Vorderkanten (Bearman and Owen, 1998), c) Kreiszyylinder mit sinusförmig im Raum modulierter Mittelachse (Owen et al., 2001). sowie d) Kreiszyylinder mit sinusförmiger Modulation des Durchmessers (Lam und Lin 2009) oder mit halbkugelförmigen Ausstülpungen (Owen et al., 2001).

Die Strukturen b) und c) zeigen im Gegensatz zu a) sowohl eine starke Unterdrückung der dynamischen Kräfte als auch eine deutliche Verringerung des Strömungswiderstandes und haben eine modulierte Grundform, bzw. wenigstens eine modulierte Vorderkante gemeinsam. Allerdings hat die Form mit rechteckigem Querschnitt den Nachteil des prinzipiell höheren Widerstandsbeiwerts und die achsenmodulierte Form c) ist stark richtungsabhängig. In der Struktur d) wird eine Verringerung von Strömungswiderstand und dynamischen Kräften mit einer Form auf der Basis eines Kreiszyylinderquerschnitts erreicht, allerdings nicht mit der gleichen Performanz wie bei c). Zusammenfassend ist davon auszugehen, dass noch keine optimale Form gefunden wurde.

Mit der Vibrisse des Seehundes wird im Vergleich dazu erstmals ein biologisches Objekt untersucht, das einen Querschnitt in Form einer Ellipse aufweist und gleichzeitig eine wellige Struktur zeigt. 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.

Experimentelle und numerische Methoden

Das Stereo- μ PIV-System, bestehend aus zwei PIV-Kameras, dem Stereo-Mikroskop-Grundkörper, einem Objektiv, einem Beleuchtungsaufbau und einer drei-Achsen Mikropositionierung, wurde bereits in Brede et al. 2006 vorgestellt. Es ermöglicht die Aufnahme von instantanen Feldern des vollständigen Geschwindigkeitsvektors in mikroskopischen Skalen,

insbesondere die Bestimmung des Reynoldsschen Spannungstensors im Nachlauf. Für die hier gezeigten Ergebnisse wurden 500 instantane 2D-2C PIV Felder ausgewertet.

Für die numerische Simulation des Vibrissennachlaufs wurde eine zeitaufgelöste, dreidimensionale direkte numerische Simulation auf einem Gitter durchgeführt, in dem eine idealisierte, von fotografisch ausgewerteten Vibrissen abgeleitete Vibrissenmodellstruktur abgebildet wurde. Details der Simulation finden sich in Witte et al. 2009. Die Simulation ermöglicht die räumliche Darstellung von instantanen Geschwindigkeitsfeldern, die Angabe des Druckfeldes, sowie die Bestimmung der Kräfte auf die Vibrissenoberfläche.

Ergebnisse

Zur Analyse der Nachlaufstruktur hinter der Vibrisse wurden Stereo- μ PIV Messungen in dreizehn Vibrissen-senkrechten Ebenen durchgeführt. Aus diesen Messungen wurden zunächst hier nicht gezeigte Felder des Reynoldsspannungstensors bestimmt, der hinsichtlich der Größe der einzelnen Komponenten und der auftretenden Isotropie den Hinweis ergaben, dass die Nachlaufströmung hinter der Vibrisse Eigenschaften von axialsymmetrischen Strömungen aufweist (Brede et al. 2008).

Durch Zusammensetzen aller Messebenen ist es nun möglich, einen Volumendatensatz des zeitgemittelten Geschwindigkeitsvektorfeldes zu erstellen. Die Anordnung der 2D-Messebenen und die Möglichkeiten der enthaltenen Daten veranschaulicht Abbildung 1. Die Farbdarstellung der Ebenen zeigt die Reynoldsspannung $\overline{u'w'}$. Die Visualisierung der Stromlinien verdeutlicht die Möglichkeiten des dreidimensionalen Volumendatensatzes, ebenso wie die Isoflächen für den Wert des λ_2 Wirbelkriteriums, welches die Wirbelkerne markiert.

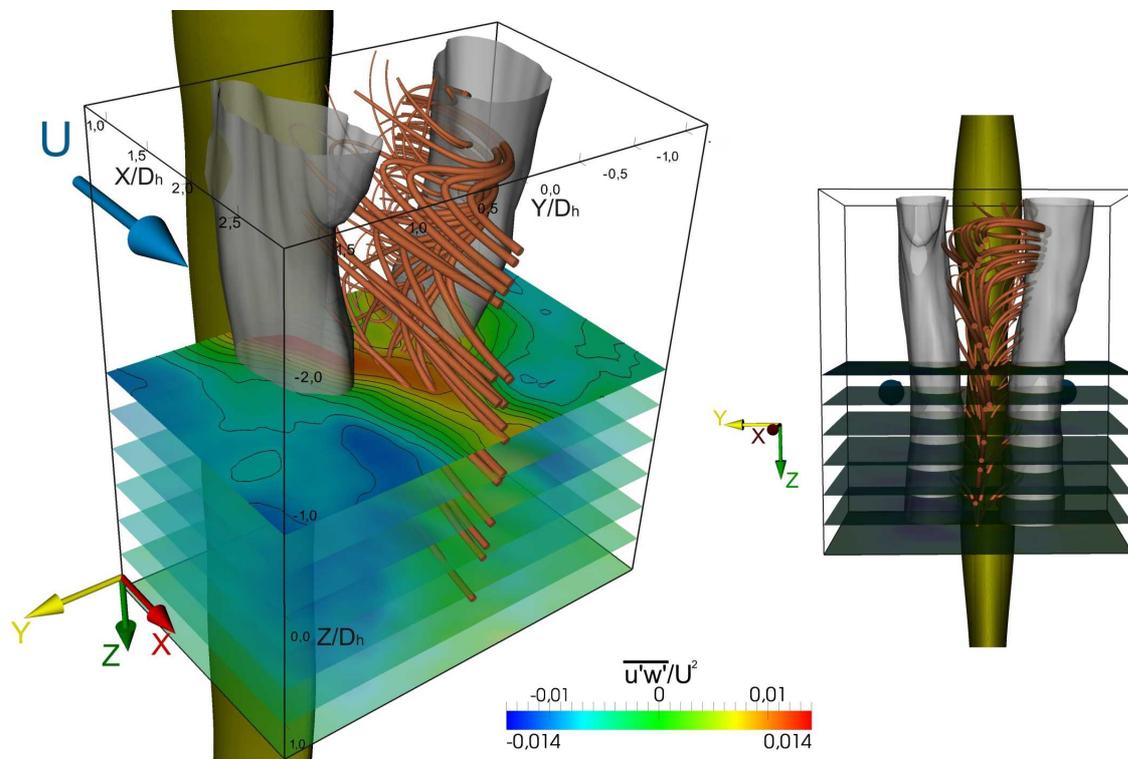


Abbildung 1: zeitgemittelter Nachlauf hinter einer Vibrisse, Stromlinien, Isoflächen des λ_2 -Wirbelkriteriums, Farbkontur: Reynoldsspannung $\overline{u'w'}$

Die räumliche Ansicht zeigt die Strömungskomponente in Achsrichtung des Zylinders, die beim Zylindernachlauf nicht vorkommt. Ausserdem ist deutlich zu erkennen, dass bei dem primären Wirbelpaar die Ausdehnung stark abhängig von der Koordinate in Spannrichtung ist mit der sich auch die Halbachsen der Vibrissenquerschnitte ändern.

Diese Modulation der Ausdehnung des Rezirkulationsgebietes ist noch deutlicher in der Isoflächendarstellung des Wirbelkriteriums λ_2 zu erkennen. Ebenso wie sich die Vibrissenquerschnitte ändern, ändert sich auch die Stärke der Wirbel, die von λ_2 angezeigt werden. Zusätzlich ist in dieser Abbildung auch die gesamte Intensität der Fluktuation in Form der turbulenten kinetischen Energie k angegeben. Die zuvor festgestellte Modulation des Rezirkulationsgebiets tritt auch für k auf, wenn alle Ebenen betrachtet werden.

Die numerische Simulation eröffnet die Möglichkeit, instantane räumliche Felder der Strömungsgeschwindigkeit im Nachlauf der Vibrisse zu untersuchen. Aus diesen wurden zum Einen die Wirbelkerne mit Hilfe des Q-Kriteriums (Jeong and Hussain, 1995) dargestellt, siehe Abbildung 2. Gleichzeitig werden die Ergebnisse denen des zum Vergleich simulierten Nachlaufs des Kreiszyllinders und des Ellipsenzyllinders gegenübergestellt. Das Wirbelfeld zeigt, dass der Nachlauf der Vibrisse deutlich anders strukturiert ist als der des Zylinders.

Die primären Wirbel hinter dem Zylinder sind ersetzt durch eine alternierende Anordnung von Wirbelschlaufen, die zwar längs der Vibrisse ausgerichtet sind, jedoch im Wechsel der Vibrissenondulationen einen Phasenversatz aufweisen. Im Ergebnis ist die Ablösung an der Vibrisse nur stückweise phasensynchron und Abschnitte gleicher Ablösephase wechseln sich in Spannrichtung der Vibrisse mit Abschnitten einer Wirbelablösung mit um 180° gedrehter Phase ab. Dieser Phasenwechsel ist bereits an der Verschiebung der Ablöselinie zu erkennen, die in Abbildung 2, rechts, im numerisch simulierten Anstrichbild deutlich wird.

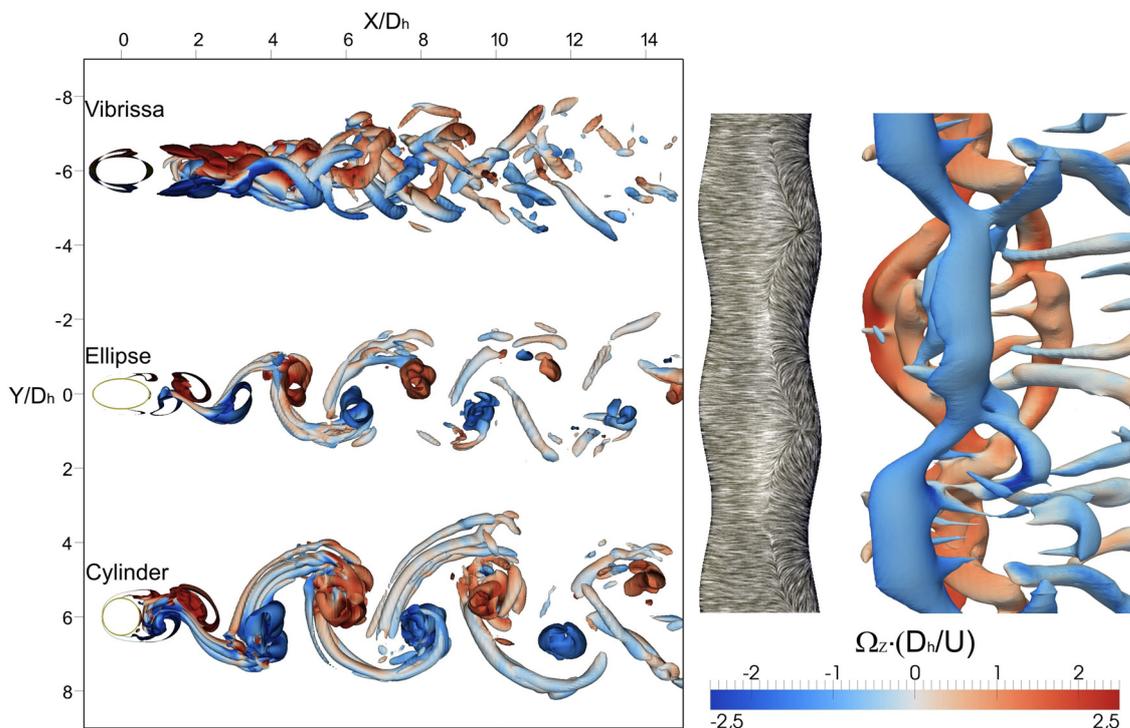


Abbildung 2: Zeitschnitt aus der numerischen Simulation für $Re = 500$, Isoflächen des Wirbelkriteriums Q , eingefärbt mit der Intensität der lokalen Drehung Ω_z , links: Vergleich von Vibrisse, Ellipse und Zylinder, rechts: Detail der Wirbelstruktur an der Vibrisse, an der Oberfläche numerisch simuliertes Anstrichbild.

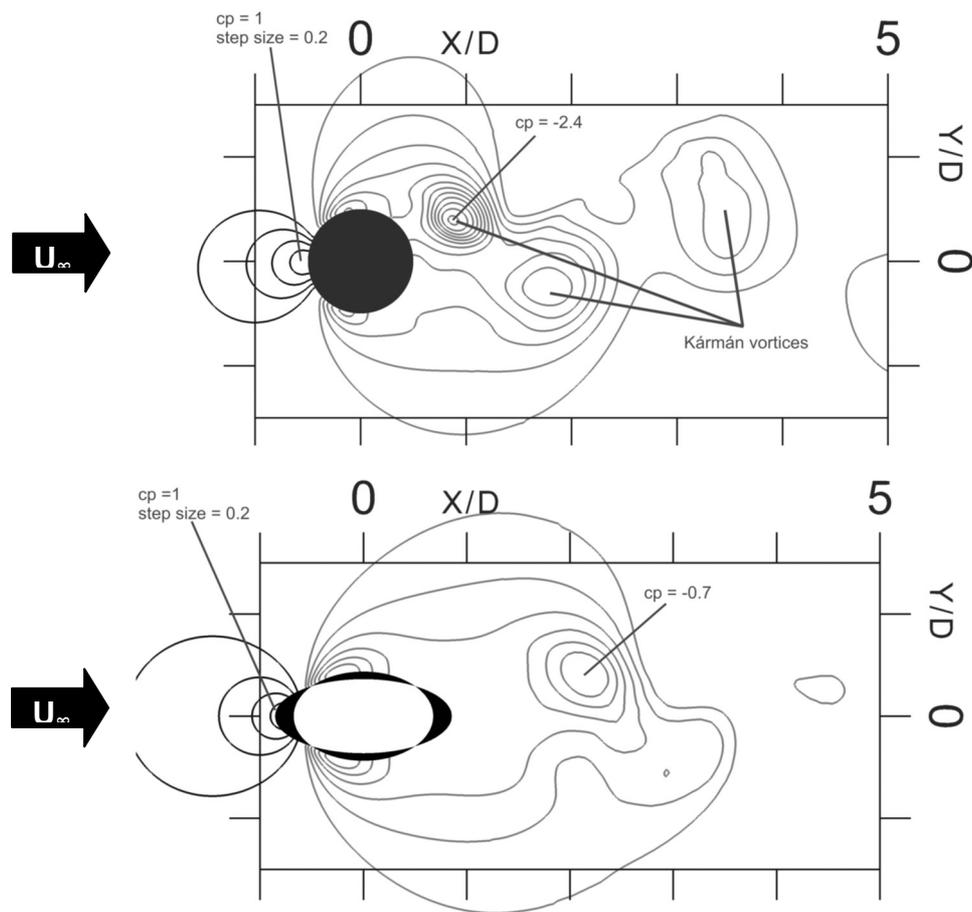


Abbildung 3: Isolinien des instantanen Druckfeldes C_p aus der numerischen Simulation bei $Re = 500$, oben für den Kreiszyylinder unten für die Seehundvibrisse

Hinsichtlich der Lage des Rezirkulationsgebietes ist im Vergleich der Nachläufe (Abbildung 2, links) deutlich zu erkennen, dass das gesamte Rezirkulationsgebiet deutlich weiter stromab liegt. Damit ist auch die Auswirkung der Wirbelbildung auf die Zylinderoberfläche in Form von dynamischen Kräften bei der Vibrisse am geringsten. Dieses lässt sich anhand der berechneten Druckfelder überzeugend belegen. In Abbildung 3 werden die berechneten Druckfelder für die Umströmungen von Zylinder und Vibrisse dargestellt. Auch hier ist, wie bereits in der Wirbelstruktur, das Rezirkulationsgebiet bei der Vibrisse stromab verlagert. Zusätzlich ist zu erkennen, dass tatsächlich das Druckfeld nah am Zylinder bis zum Einsetzen der Wirbelbildung symmetrisch bezüglich der x-z Ebene ist.

Diskussion

Mit der experimentellen und numerischen 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 auch deutliche Unterschiede zu den Turbulenzeigenschaften zweidimensionalen Zylinderumströmungen.

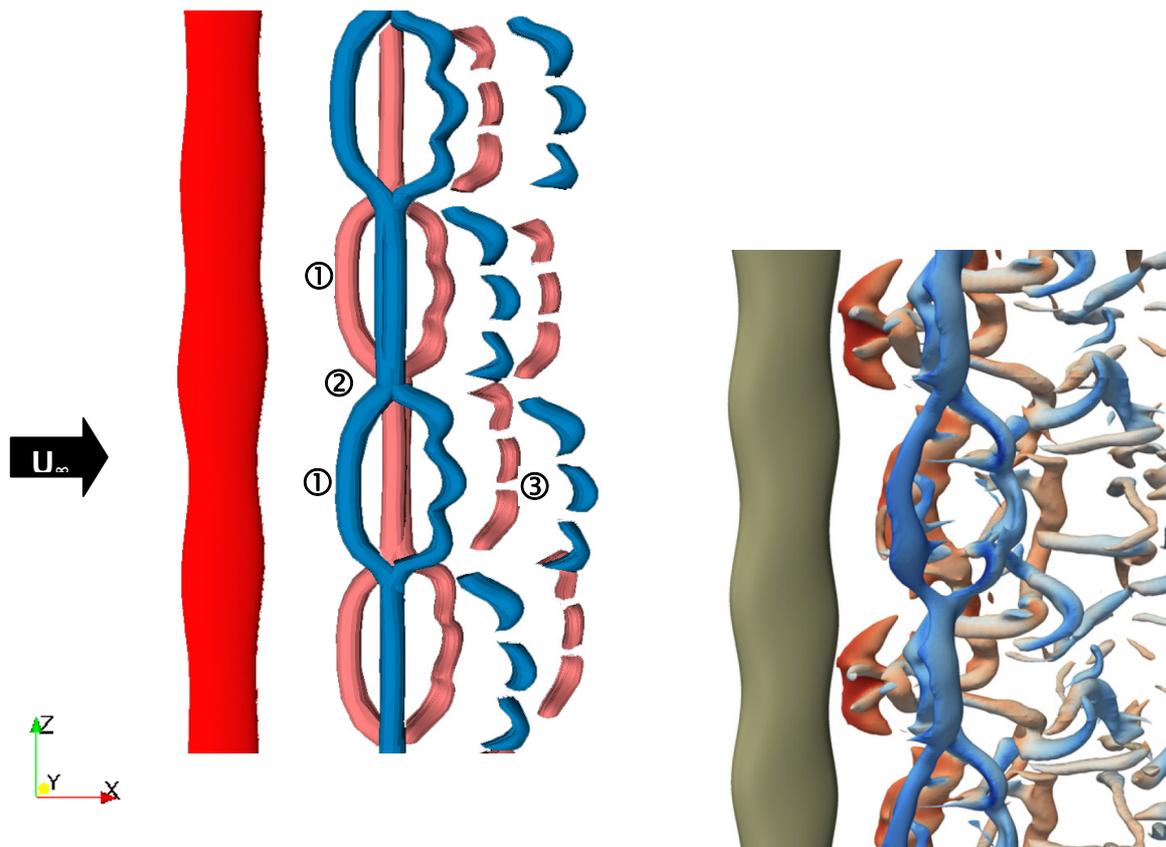


Abbildung 4: Idealisiertes Wirbelmodell (links) für den Nachlauf hinter der Seehundvibrisse. Die Einfärbung gibt die Drehrichtung der Wirbel wieder, rechts: Instantanes Wirbelfeld aus der numerischen Simulation bei $Re = 500$ zum Vergleich

Die numerische Simulation erlaubt die Bestimmung des instantanen dreidimensionalen Wirbelfeldes. In Abbildung 4 wurde aus diesem Feld ein idealisiertes Wirbelmodell abgeleitet (links), in der die wesentlichen Eigenschaften der Wirbelstruktur hinter der Vibrisse deutlich hervortreten sollen: Die Wirbelentstehung erfolgt abschnittsweise in Spannrichtung der Vibrisse, dabei ist die Phasenlage benachbarter Wirbelteile jeweils entgegengesetzt, siehe Abb. 4 (1). Die Übergänge („Knoten“) zwischen den Abschnitten verschiedener Phasenlage sind hinter den Querschnitten mit flacher Ellipse lokalisiert (2). Die dabei entstehenden Bögen zerfallen zuerst zu miteinander verbundenen Schlaufen (3), dann zu Hufeisenwirbeln.

Diese charakteristische Wirbelstruktur ergibt sich aus dem räumlich Wechsel zwischen der Umströmung nach Art der stumpfen Körper (rundliche Ellipse) und in der Art der schlanken Körper (schlanke Ellipse) entlang der Vibrisse. Während an ersterem die Primärwirbelbildung dominiert, ist diese im schlanken Bereich reduziert, was den Wechsel der Phasenlage (Knoten) ermöglicht. Durch die alternierende Ablösephase in Spannrichtung ist im Ergebnis der periodische Druckanteil in der Gesamtwirkung auf die Vibrisse null.

Da die Wirbelröhren nun bereits als Bögen erzeugt werden, entsteht hinter diesem Körper mit veränderlichem Durchmesser eine dreidimensionale Wirbelstruktur, die aufgrund der gegenseitigen Induktion wesentlich stärkeren gegenseitigen Streckungsmechanismen unterworfen ist als eine klassische Wirbelstraße, die aus überwiegend geraden Wirbelröhren besteht. In der Folge der dreidimensionalen Wirbelstruktur steigt die Wirbelstreckung und Deformation im Nachlauf stark an, die Wirbelstruktur zerfällt im Vergleich zum Zylindernachlauf schnell.

Die drei Besonderheiten der Wirbelstruktur im Nachlauf der Seehundvibrisse – Unterdrückung der Ablösung im schlanken Bereich, Verlängerung des Rezirkulationsgebiets, Symmetrie des Druckfeldes – reduzieren gemeinsam genau die periodischen Kräfte auf die Vibrisse, die aus der eigenen Wirbelstruktur stammen. So werden effektiv wirbelinduzierte Schwingungen verhindert. Im Ergebnis ist aus den numerischen Daten abzulesen, dass der dynamische Auftrieb um mehr als 90% und der mittlere Strömungswiderstand um 40% verringert werden, jeweils im Vergleich mit einem Kreiszyylinder bei gleichem hydraulischen Durchmesser. Mit diesen Eigenschaften könnte die Vibrissenstruktur zukünftig als bionisches Modell für eine Gestaltung technischer Strömungsbauteile dienen.

Danksagung

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

Literatur

- Bearman, P. W. and Owen, J. C. (1998). Reduction of bluff-body drag and suppression of vortex shedding by the introduction of wavy separation lines. *J. Fluids Struct.* 12, 123-130.
- 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 26th -29th, 2006
- Brede, M., Witte, M., Leder, A., Miersch, L., Dehnhardt, G. (2008): Stereo- μ PIV investigation of the separated flow behind a 3D shaped vibrissae from an aquatic mammal, Proceedings of the 14th Int Symp on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, Calouste Gulbenkian Foundation, Lisbon, Portugal, 07-10 July, 2008
- Dehnhardt, G., Mauck, B. and Bleckmann, H. (1998). Seal whiskers detect water movements. *Nature* 394, 235-236.
- Hanke, W., Witte, M., Miersch, L., Brede, M., Oeffner, J., Michael, M., Hanke, F., Leder, A., Dehnhardt, G. (2010) Harbor seal vibrissa morphology suppresses vortex induced vibrations, *Journal of Experimental Biology* (im Druck)
- Jeong, J. and Hussain, F. (1995). On the identification of a vortex. *J. Fluid Mech.* 285, 69-94
- Lam, K.; Lin, Y. F. (2009): Effects of wavelength and amplitude of a wavy cylinder in cross-flow at low Reynolds numbers. *J. Fluid Mech.* 620, 195–220
- Scruton, C. (1965). On the wind-excited oscillations of stacks, towers and masts. In Proc. Symp. *Wind Effects Build. Struct.*, pp. 798-836. London: HMSO
- Tombazis, N. and Bearman, P. W. (1997). A study of three-dimensional aspects of vortex shedding from a bluff body with a mild geometric disturbance. *J. Fluid Mech.* 330, 85-112
- Owen, J. C., Bearman, P. W. und Szewczyk, A. A. (2001). Passive control of VIV with drag reduction. *J. Fluids Struct.* 15, 597-605
- Witte, M., Michael, M., Brede, M., Leder, A. (2009), Untersuchungen der instationären Strömungstopologie im Nachlauf einer Seehundvibrissein: A. Delgado, C. Rauh, H. Lienhart, B. Ruck, A. Leder, D. Dopheide (Hrsg.) „Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik“ -17. Fachtagung der GALA e. V. 2009, Universität Erlangen, S. 55.1 – 55.8, ISBN 978-3-9805613-5-8