

Experimentelle Untersuchung im Nachlauf vibrissenähnlicher Strukturen mit variierenden Geometrieparametern

EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS OF THE WAKE BEHIND BLUFF BODIES WITH SHAPE VARIATION

T. Birkner, M. Brede, G. Dehnhardt*, A. Leder

Universität Rostock, Lehrstuhl Strömungsmechanik, Albert-Einstein-Straße 2, 18051 Rostock

* Marine Science Center, Am Yachthafen 3a, 18119 Rostock - Hohe Düne

Nachlauf stumpfer Körper, TR-PIV, Wirbelunterdrückung, Widerstandsminderung
PIV, bluff body wake, VIV suppression, Drag reduction

Kurzfassung

In diesem Beitrag werden die Ergebnisse zeitaufgelöster Nachlaufuntersuchungen von Modellen bei hohen Reynoldszahlen vorgestellt, deren Körperformen der Seehundvibrisse nachempfunden sind. Hierbei wurden die Querschnittsparameter variiert, um zu einer richtungsunabhängigen Körperkontur zu gelangen, die ähnliche Eigenschaften bezüglich der Wirbelunterdrückung und Widerstandsminderung aufweist, wie das biologische Vorbild. Die experimentellen Untersuchungen wurden im Windkanal mittels Time-Resolved Stereo Particle Image Velocimetry durchgeführt. Zusätzlich wurden die Widerstands- und Auftriebsbeiwerte aus Kraftmessungen bestimmt.

Die Ergebnisse der untersuchten Modellkörper zeigen, dass auch bei hohen Reynoldszahlen die Ausbildung einer primären Wirbelstraße gestört ist. Der Vergleich der untersuchten Querschnittsparameter zeigt deutlich, dass bei stumpfer werdenden Querschnitten der Effekt der Wirbelunterdrückung erhalten bleibt. Auch der Widerstandsbeiwert ist deutlich niedriger als bei einem vergleichbaren Kreiszyylinder, jedoch steigt er im Vergleich zum Ausgangsmodell kontinuierlich, mit stumpfer werdendem Querschnitt an.

1 Einführung

Die Umströmung zylindrischer stumpfer Körper spielt in vielen technischen Anwendungsgebieten, wie z. B. der Offshore-Industrie oder der Bauwerksaerodynamik, eine große Rolle. So wirken auf diese Strukturen auf Grund der periodischen Wirbelablösung sowohl hohe Widerstandskräfte als auch dynamische Auftriebskräfte. Diese periodischen Kräfte führen zu einer Schwingungsanregung der betroffenen Strukturen, die als wirbelinduzierte Schwingungen oder auch „vortex induced vibration (VIV)“ bezeichnet werden. Diese Schwingungen reduzieren die Lebensdauer und können im Resonanzfall sogar zur Zerstörung führen. Deshalb ist die Minderung der instationären Kräfte und die Unterdrückung periodischer Wirbelablösung schon seit langem eine

Herausforderung für die Technik. Zdravkovich (1981) faßte einige Möglichkeiten zusammen, die wirbelinduzierten Schwingungen am Kreiszyylinder zu kontrollieren. Der Einsatz von Scruton-Spiralen, die von Scruton und Walshe (1957) vorgestellt wurden, ist eine bewerte und weit verbreitete Möglichkeit, die Ausbildung kontinuierlicher Wirbelstrukturen durch erzwungene Ablösung zu unterbinden. Jedoch führen diese Anbauten zu einer Erhöhung des Widerstandes. Eine andere Option, die Wirbelablösung ohne Widerstandserhöhung zu kontrollieren, ist der Einsatz von ähnlich spiralförmig angeordneten Kabeln (Lee und Kim (1997)) oder Nuten (Huang (2011)).

Es finden sich einige passive Mechanismen, die durch Modifikationen der Oberflächenkontur die Wirbelablösung unterdrücken und gleichzeitig den Widerstand mindern. Tombazis und Bearman (1997) zeigten an halbelliptischen Querschnitten, dass wellige Hinterkanten zu dreidimensionalen Wirbelstrukturen an nominal zweidimensionalen Geometrien führen. Sie beschreiben dabei die ungleichmäßige Ablösung und die gestörte Wirbelstraße als Ursache für eine Reduktion des Widerstandsbeiwertes um 34% bei einer Reynoldszahl von $Re=40.000$. Bearman und Owen (1998) führten diese Arbeit durch Untersuchungen des Einflusses von welligen Vorderkanten an rechteckigen Querschnitten weiter. Sie stellten fest, dass der Widerstandsbeiwertes um 30 % niedriger ist und dass ab einer Welligkeit von $w/\lambda = 0.06 - 0.09$ die Wirbelablösung komplett unterdrückt wird. Owen et al. (1999) übertrug diese Ergebnisse auf den Kreiszyylinder durch Einführung einer welligen Querschnittsachse. Für diese Geometrie wurde eine Widerstandsminderung von 47% festgestellt. Aufbauend auf diesen Ergebnissen entwickelten Owen et al. (2001) einen Mechanismus für gleichmäßige Kreiszyylinder, bei dem durch das spiralförmige Anbringen von Halbschalenelementen (sog. „bumps“) richtungsunabhängig die wirbelinduzierten Schwingungen unterdrückt und gleichzeitig der Widerstand verringert wird. Es wurde eine Widerstandsminderung von 25% und eine wirksame Unterdrückung der Wirbelablösung festgestellt.

Eine weitere Methode ist der Einsatz von Zylindern mit einer sinusförmigen Variation der Querschnittsdurchmesser. Ahmed und Bays-Muchmore (1992), Wang et al. (2004) und Lam et al. (2004b) untersuchten die dreidimensionalen Nachlaufstrukturen und die ungleichmäßige Wirbelablösung dieses welligen Zylinders. Lam et al. (2004a) zeigten, dass diese Oberflächenkontur wirbelinduzierte Schwingungen unterdrückt und eine Widerstandsminderung von ca. 20% bezüglich eines äquivalenten glatten Kreiszyinders bewirkt.

Das Bestreben, wirbelinduzierte Schwingungen bei gleichzeitiger Widerstandsminderung zu unterdrücken, ist nicht nur ein technisches Problem. In der Natur nutzen verschiedene Säugetiere ihre Barthaare, die sogenannten Vibrissen, als Tastorgane. Die Wurzeln dieser Vibrissen sind mit einer Vielzahl von Nervenzellen und Mechanorezeptoren umgeben (Hyvärinen et al. (2009)), was sie sehr empfindlich auf mechanische Reize macht. Zusätzlich zum Einsatz als Tastorgan nutzen einige Meeressäuger ihre Vibrissen zum Aufspüren und Analysieren von Strömungsstrukturen (Dehnhardt et al. (1998)). Dehnhardt et al. (2001) fand heraus, dass Seehunde (*Phoca vitulina*) ihre Vibrissen nutzen, um die von Beutefischen erzeugten Wasserbewegungen

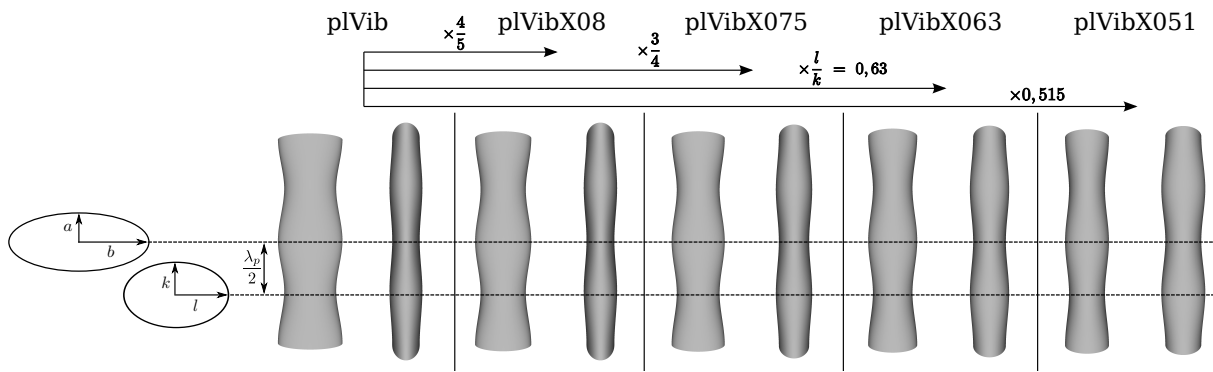


Abb. 1: Vergleich der untersuchten Körpergeometrien

Tab. 1: Geometrieparameter der einzelnen Modelle

	pIVib	pIVibX08	pIVibX075	pIVibX063	pIVibX051
Faktor	1	$4/5 = 0,8$	$3/4 = 0,75$	$l/k = 0,63$	0,51
Halbachsenverhältnis a/b	2,38	1,90	1,78	1,50	$1,225 = l/k$
Halbachsenverhältnis k/l	1,59	1,27	1,19	1,00	$0,816 = b/a$
mittlerer, hydraulischer Durchmesser \overline{D}_h [mm]	≈ 30	30	30	30	30
Periodenlänge $\frac{\lambda_p}{D_h}$	2,68	2,67	2,67	2,67	2,67

aufzuspüren und zu verfolgen. Um während der Bewegung des Seehundes effektiv wirken zu können, entwickelte sich im Laufe der evolutionären Entwicklung eine Oberflächenkontur der Vibrisse heraus, die unempfindlich gegenüber wirbelinduzierten Schwingungen ist. Hanke et al. (2010) zeigte, dass eine ähnliche Geometrie bei einer Reynoldszahl von $Re=500$ die Wirbelablösung unterdrückt und gleichzeitig den Widerstand um ca. 40 % bezüglich eines vergleichbaren Kreiszylinders senkt.

Aufgrund dieser hervorragenden Strömungseigenschaften besitzt die Geometrie der Seehundvibrisse ein sehr großes technisches Potential. Ziel dieser Arbeit ist es, die Geometrieparameter der Seehundvibrisse so zu modifizieren, dass sich eine richtungsunabhängige Zylinderform ergibt, die im Vergleich zum Kreiszyylinder deutlich reduzierte Widerstands- und dynamische Auftriebswerte aufweist.

2 Modellgeometrien

Ausgangspunkt für die Geometrievariation ist die planare Vibrisse (pIVib). Sie hat eine wellige Oberflächenkontur, bei der das Halbachsenverhältnis der elliptischen Querschnitte entlang der Körperlängsachse variiert. Sie unterscheidet sich von der Originalvibrisse lediglich dadurch, dass die elliptischen Querschnitte senkrecht zur Körperlängsachse (z) liegen und die Periodenlänge λ_p halbiert ist. Für diese Geometrie ist bekannt, dass sie auch bei hohen Reynoldszahlen die gleichen Strömungseigenschaft aufweist, wie das Originalmodell (Birkner et al. (2011)). Die Wirksamkeit dieser Geo-

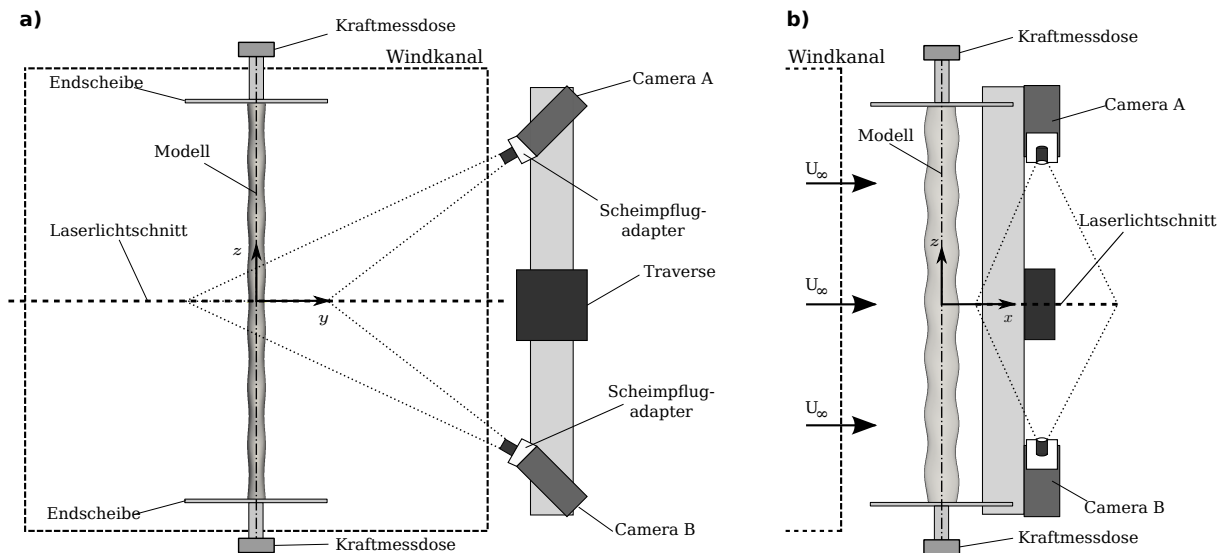


Abb. 2: Schematische Darstellung des Messaufbaus in a) Frontansicht und b) Seitenansicht

metrie ist aber stark von der Anströmrichtung abhängig. Ausgehend von dieser Geometrie werden nun kontinuierlich die Halbachsenverhältnisse der elliptischen Querschnitte verkleinert. Abbildung 1 zeigt die dadurch entstandenen Geometrien und Tabelle 1 führt die jeweiligen Geometrieparameter auf. Besonderes Augenmerk soll hierbei auf die Geometrie mit den Bezeichnungen „pVibX063“ und „pVibX051“ gerichtet werden. Bei der Erstgenannten wurden die Halbachsenverhältnisse um einen Faktor 0,63 verkleinert, so dass im stumpfsten Bereich die Ellipse zu einem Kreis geworden ist. Die Geometrie „pVibX051“ ist dadurch charakterisiert, dass die beiden Halbachsenverhältnisse a/b und k/l jeweils der Kehrwert des anderen sind. Das heißt, dass es sich um den gleichen Ellipsenquerschnitt handelt, der jeweils um 90° gedreht ist. Dadurch besitzt diese Geometrie bei Queranströmung 0° und bei Drehung der Geometrie um 90° um die Körperlängsachse z die gleiche Kontur haben. Um eine Vergleichbarkeit der verschiedenen Modelle zu gewährleisten wurden alle Geometrien auf einen mittleren hydraulischen Durchmesser von 30 mm skaliert, das entspricht etwa dem 44fachen der Originalvibrisse.

3 Experimenteller Aufbau

Die Experimente wurden im Windkanal Göttinger Bauart mit offener Messstrecke und einem rechteckigen Querschnitt ($0,65\text{m} \times 0,65\text{m}$) durchgeführt. Die Anströmgeschwindigkeit U_∞ lag bei 20 m/s mit einem mittleren Turbulenzgrad Tu von 0,5%, was bezogen auf den mittleren hydraulischen Durchmesser \overline{D}_h einer Reynoldszahl von $Re = 40.000$ entspricht. Das PIV-System bestand aus einem frequenzverdoppelten Nd:YAG Doppelpulslaser mit einer mittleren Energiedichte von 15 mJ je Puls und zwei Hochgeschwindigkeitskameras (CMOS, $1280 \times 1024\text{px}$) mit Scheimpflugadapter und Makroobjektiv (60mm). Die Messungen wurden mit einer Doppelpulsfrequenz von 1000 Hz und einer Stereoanordnung nach Willert (1997), mit je einer Kamera auf jeder Seite des Laserlichtschnitts (Abb. 2). Dies ermöglicht die zusätzlich Bestimmung der „out-of-plane“-Komponente der Geschwindigkeit (w) bei gleicher Deformation und Lichtinten-

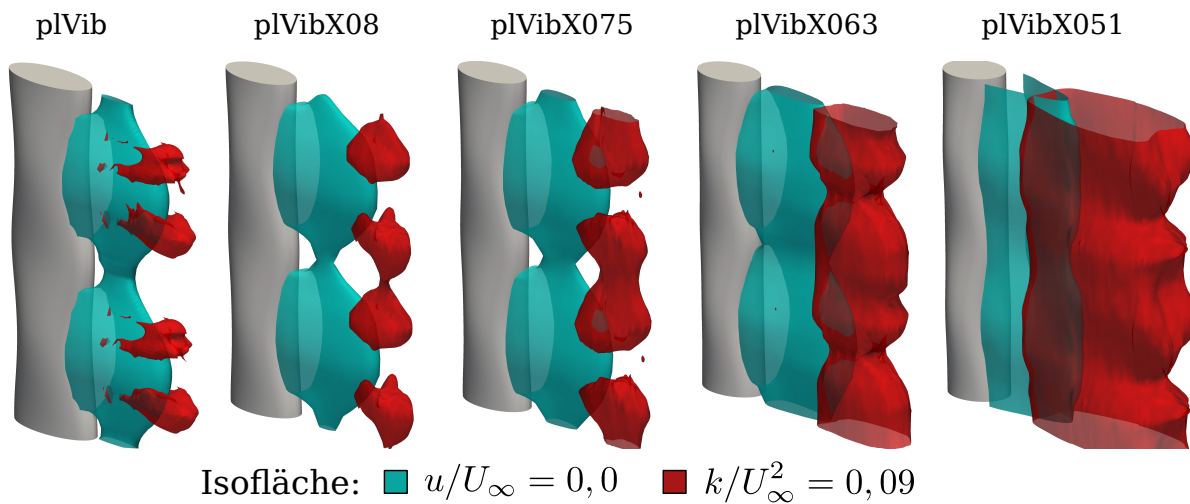


Abb. 3: Vergleich der Isoflächen für die Einhüllende des Rezirkulationsgebiets ($u/U_\infty = 0,0$) und der turbulenten kinetischen Energie k/U_∞^2 der verschiedenen Geometrien bei Anströmung in Vorzugsrichtung

sität beider Aufnahmen. Das Messfeld erstreckte sich über $75 \times 66\text{mm}$ und wurde mit einer adaptiven Korrelation ($32 \times 32\text{px}^2$) mit 50% Overlap ausgewertet.

Die Kraftmessungen wurde dadurch realisiert, dass die Modelle in DMS-Kraftsensoren gelagert wurden (Abb. 2), um durch die Lagerkräfte auf die Strömungskräfte schließen zu können. Die angebrachten Endscheiben und die Halterungen wurden abgeschirmt, um einen Einfluss auf die Messwerte auszuschließen. Die instationären Widerstands- und Auftriebskräfte wurden mit einer Frequenz von 2000Hz ermittelt.

4 Diskussion der Ergebnisse

Die zeitgemittelten Geschwindigkeitsfelder im Nachlauf der untersuchten Modelle zeigen bei Anströmung in Vorzugsrichtung (Abb. 3), wie sich das Rezirkulationsgebiet (blau) und die turbulente kinetische Energie k (rot) mit stumpfer werdenden Querschnitten verändert. Während das Rezirkulationsgebiet bei der schlanksten Geometrie („pIVib“) entlang der Körperlängsachse unterschiedlich ausgeprägt ist, ist es beim stumpfsten Modell („pIVibX051“) relative gleichförmig verteilt. Das Totwasser hat aber bei allen Modellen in etwa die gleiche Länge. Es wird deutlich, dass die Bereiche hoher turbulenter Energie mit stumpfer werdenden Abmessungen größer werden und der Maximalwert der turbulenten kinetischen Energie ebenfalls leicht steigt. Die Entfernung der Gebiete maximaler turbulenter Energie zum Modell bleiben aber äquivalent zum Totwasser gleich. Verglichen mit einem Kreiszyylinder sind aber die Gebiete gleicher turbulenter kinetischer Energie deutlich kleiner. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die ablösenden Wirbelsysteme deutlich kleinskaliger ausgeprägt sind, wodurch die Schwingungsanregung der Struktur vermindert wird.

Werden die verschiedenen Modelle quer zur Vorzugsrichtung angeströmt, so zeigen sich deutliche Unterschiede im Strömungsverhalten (Abb. 4). So ist das Rezirkulationsgebiet deutlich kürzer und kontinuierlich entlang der Körperachse verteilt. Auch die turbulente kinetische Energie ist mehr als doppelt so groß und ebenfalls gleichmäßig ent-

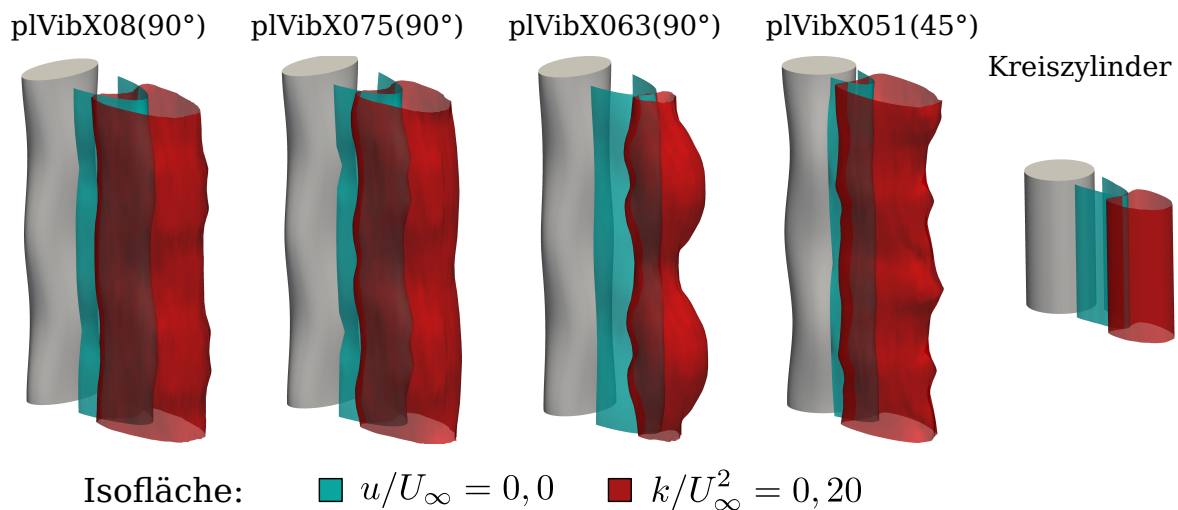


Abb. 4: Vergleich der Nachläufe der verschiedenen Geometrien bei Drehung der Anströmrichtung um die Körperlängsachse (90° bzw. 45°)

lang der z -Achse verteilt. Dies läßt darauf schließen, dass sich bei dieser Anströmung eine gleichmäßige Wirbelstraße ausbildet. Im Großen und Ganzen sind die Nachläufe in diesen Fällen vergleichbar mit einem klassischen Zylindernachlauf. Die Modellgeometrie „pIVibX051“ wurden im Gegensatz zu den anderen Modellen im 45° Winkel zur Vorzugsrichtung angeströmt, weil diese Geometrie, wie in Abschnitt 2 erwähnt, längs und quer gleich ist. Im Fall der 45° -Anströmung bildet sich aber ein zylinderähnlicher Nachlauf, mit kleinem Totwasser und hohen turbulenten Energien aus. Dies zeigt die Richtungsabhängigkeit dieser Geometrien.

Die ermittelten Ergebnisse des Strömungsfeldes zeigen sich auch in den Widerstandsbeiwerten c_w (Abb. 5). So besitzen alle Geometrien in Vorzugsrichtung einen deutlich niedrigeren Widerstandsbeiwert als ein vergleichbarer Kreiszyylinder. Wie im Strömungsverhalten zu erkennen, steigt der Widerstand mit Abnahme der Halbachsenverhältnisse an. Das bedeutet, dass die Widerstandsminderung, die bei der Geometrie „pIVib“ noch bei ca. 42% lag, bei dem Modell mit der Bezeichnung „pIVibX051“ nur noch bei ca. 23% liegt. Bei Queranströmung sind die Widerstände der Modelle „pIVib – pIVibX075“ deutlich größer als beim Zylinder. Die Geometrie „pIVibX063“ bei der die Modellquerschnitte zwischen Ellipse und Kreis variieren, ist bei ungünstigster Anströmung (90°) dem Kreiszyylinder bezüglich des Widerstandes gleichgestellt. Bei der Geometrie „pIVibX051“ wirken sich bei 45°-Anströmung die veränderten Strömungsverhältnisse ebenfalls negativ auf den Widerstand aus und lassen ihn bezüglich der Vorzugsrichtung ansteigen. Jedoch besitzt diese Oberflächenkontur unabhängig von der Anströmung einen niedrigeren c_w – Wert.

Abbildung 6 zeigt die dynamischen Auftriebsbeiwerte $\sqrt{c_a^2}$ der Modellgeometrien bei Anströmung in Vorzugsrichtung im Vergleich zu den von Norberg (2003) ermittelten analytischen Funktion des Kreiszyinders. Es wird deutlich, dass alle Oberflächenmodifikationen unter diesen Strömungsverhältnissen die wirbelinduzierten Schwingungsanregung unterbinden. Eine Ermittlung der dynamischen Schwankungen der Auftriebs-

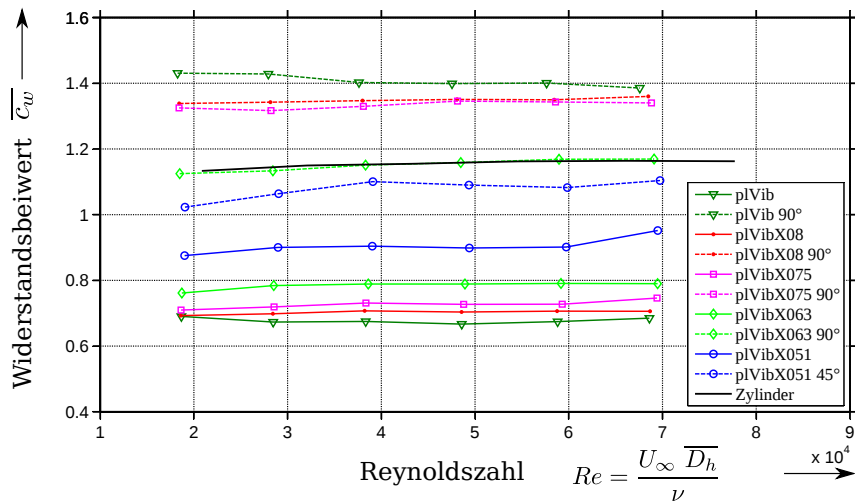


Abb. 5: Vergleich der Widerstandsbeiwerte der verschiedenen Geometrien über der Reynoldszahl

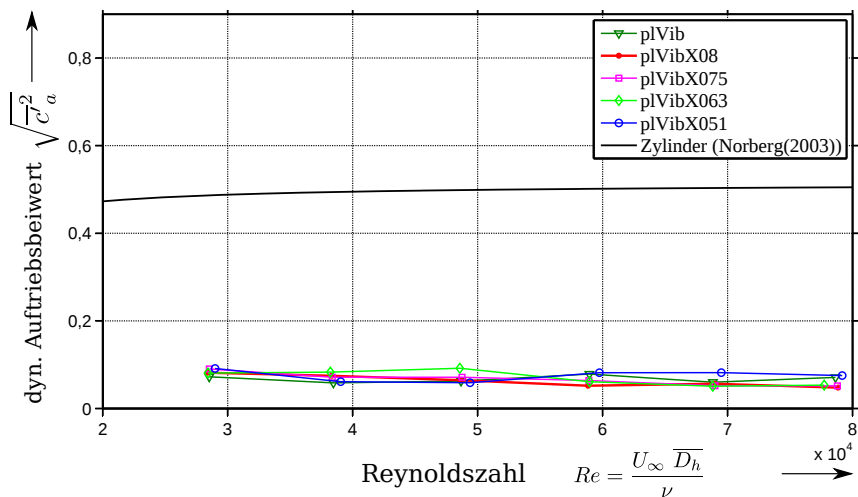


Abb. 6: Vergleich der Auftriebsbeiwerte der verschiedenen Geometrien über der Reynoldszahl

beiwerte bei Queranströmung war auf Grund von Resonanzeffekten, hervorgerufen durch Wirbelfrequenzen, nicht möglich. Jedoch zeigt der Fakt, dass bei Queranströmung eine Schwingungsanregung erfolgt, dass alle Geometrien eine Richtungsabhängigkeit bezüglich ihrer optimalen Wirkung auf Widerstand und VIV haben.

5 Zusammenfassung

Die Ergebnisse der durchgeführten Strömungsfeldmessungen mittels PIV und die Kraftmessungen zeigen die Entwicklung der vibrissenähnlichen Oberflächenkonturen bei stumpfer werdenden Modellparametern. Es wird deutlich, dass die Eigenschaft der Unterdrückung wirbelinduzierter Schwingungen bei Anströmung in Vorzugsrichtung beibehalten wird. Auch die Widerstandsminderung bleibt erhalten, jedoch sinkt ihre Effektivität mit zunehmender Stumpfheit. Erste weiterführende Untersuchungen an einem Modell mit verändertem Übergang zwischen den Ellipsenquerschnitten zeigen, dass eine Richtungsunabhängigkeit bei deutlich reduzierten Widerstandsbeiwerten gegenüber dem Kreiszylinder erreicht werden kann.

Danksagung

Die Autoren danken Herrn Dr. A. Wolter für die technische Unterstützung bei den Kraftmessungen im Windkanal.

Besonderer Dank gilt außerdem der interdisziplinären Stipendiatenförderung der Universität Rostock für die Förderung dieses Projektes.

Literatur

- Ahmed, A. und Bays-Muchmore, B.: Transverse flow over a wavy cylinder. In: *Phys. Fluids A*, Band 4 (9):S. 1959–1967, 1992.
- Bearman, P.W. und Owen, J.C.: Reduction of bluff-body drag and suppression of vortex shedding by the introduction of wavy separation lines. In: *Journal of Fluids and Structures*, Band 12:S. 123–130, 1998.
- Birkner, T., Witte, M., Brede, M. und Leder, A.: Vergleich zeitaufgelöster Stereo- PIV Messungen im Nachlauf stumpfer Körper mit vibrissenähnlicher Oberflächenkontur. In: *Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik - 19. Fachtagung*. 2011.
- Dehnhardt, G., Mauck, B. und Bleckmann, H.: Seal whiskers detect water movements. In: *Nature*, Band 394:S. 235 – 236, 1998.
- Dehnhardt, G., Mauck, B., Hanke, W. und Bleckmann, H.: Hydrodynamic Trail-Following in Harbor Seals (*Phoca vitulina*). In: *Science*, Band 293:S. 102 – 104, 2001.
- Hanke, W., Witte, M., Miersch, L., Brede, M., Oeffnet, J., Michael, M., Hanke, F., Leder, A. und Dehnhardt, G.: Harbor seal vibrissa morphology suppresses vortex-induced vibrations. In: *Journal of Experimental Biology*, Band 213:S. 2665–2672, 2010.
- Huang, S.: VIV suppression of a two-degree-of-freedom circular cylinder and drag reduction of a fixed circular cylinder by the use of helical grooves. In: *Journal of Fluids and Structures*, Band 27:S. 1124 – 1133, 2011.
- Hyvärinen, H., Palviainen, A., Strandberg, U. und Holopainen, I.J.: Aquatic Environment and Differentiation of Vibrissae: Comparison of Sinus Hair Systems of Ringed Seal, Otter and Pole Cat. In: *Brain Behav Evol*, Band 74:S. 268–279, 2009.
- Lam, K., Wang, F.H., Li, J.Y. und So, R.M.C.: Experimental investigation of the mean and fluctuating forces of wavy (varicose) cylinder in a cross-flow. In: *Journal of Fluids and Structures*, Band 19:S. 321–334, 2004a.
- Lam, K., Wang, F.H. und So, R.M.C.: Three-dimensional nature of vortices in the near wake of a wavy cylinder. In: *Journal of Fluids and Structures*, Band 19:S. 815–833, 2004b.
- Lee, S.-J. und Kim, H.-B.: The effect of surface protrusions on the near wake of a circular cylinder. In: *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Band 69-71:S. 351–361, 1997.
- Norberg, C.: Fluctuating lift on a circular cylinder: review and new measurements. In: *Journal of Fluids and Structures*, Band 17:S. 57–96, 2003.
- Owen, J.C., Bearman, P.W. und Szewczyk, A.A.: Passive Control of VIV with drag Reduction. In: *Journal of Fluids and Structures*, Band 15:S. 597–605, 2001.
- Owen, J.C., Szewczyk, A.A. und Bearman, P.W.: Suppressing Karman Vortex Shedding by Use of Sinuous Circular Cylinders. In: *APS Division of Fluid Dynamics Meeting Abstracts*. 1999.
- Scruton, C. und Walshe, D.E.J.: A means for avoiding wind-excited oscillations of structures with circular or nearly circular cross section. In: *Natl. Phys. Lab. (U.K.), Aero Rep.*, Band 335:S. Br. Pat 907,851, 1957.
- Tombazis, N. und Bearman, P. W.: A study of three-dimensional aspects of vortex shedding from a bluff body with a mild geometric disturbance. In: *J. Fluid Mech.*, Band 330:S. 85–112, 1997.
- Wang, F.H., Jiang, G.D. und Lam, K.: A study of velocity fields in the near wake of a wavy (varicose) cylinder by LDA. In: *Flow Measurement and Instrumentation*, Band 15:S. 105–110, 2004.
- Willert, C.: Stereoscopic digital particle image velocimetry for application in wind tunnel flows. In: *Measurement Science and Technology*, Band 8 (12):S. 1465–1479, 1997.
- Zdravkovich, M.M.: Review and classification of various aerodynamic and hydrodynamic means for suppressing vortex shedding. In: *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Band 7:S. 145–189, 1981.