

## **Dreidimensionale biomimetische Formgebung zur Verringerung von dynamischen Kräften an quer angeströmten stumpfen Körpern nach dem Vorbild der Seehundvibrisse**

### **A 3D biomimetic shape based on the vibrissa of a seal to reduce dynamic forces on a bluff body**

**Martin Brede, Thomas Birkner, Matthias Witte, Guido Dehnhardt\* und Alfred Leder**  
Universität Rostock, Lehrstuhl für Strömungsmechanik, Albert-Einstein-Str. 2, 18059 Rostock  
\* Marine Science Center, Am Yachthafen 3a, 18119 Rostock – Hohe Düne

dynamische Kräfte, Strömungswiderstand, stumpfer Körper, PIV, Seehundvibrisse

### **Zusammenfassung**

Dreidimensional geformte Barthaare, die sogenannten Vibrissen, ermöglichen es Seehunden, den Nachlauf von Beutefischen wahrzunehmen. Die dreidimensionale Form ist dabei für die Unterdrückung selbstinduzierter Wirbel der Vibrisse verantwortlich, die anderenfalls die Nachlaufwirbel der Beute überdecken. Dieser Mechanismus der passiven Kontrolle von Nachlaufwirbeln ist von besonderem Interesse für technische Anwendungen, die eine Reduktion der induzierten Kräfte aus einer Wirbelstraße erfordern.

Die Untersuchung von Vibrissenstrukturen mit PIV und LDA sowie die Ergebnisse der numerischen Simulation erlauben eine detaillierte Rekonstruktion der Wirbelstruktur. Aufbauend auf diesen Ergebnissen wird die Vibrissenstruktur auf stumpfe Körper größerer Reynoldszahl übertragen und den Erfordernissen einer allseitigen Anströmung angepasst. Mit diesen vibrissenähnlichen Strukturen ist es möglich, die dynamischen Kräfte an stumpfen Körpern in variablen Strömungssituationen auch in der technischen Anwendung signifikant zu verringern.

### **Einleitung**

In Verhaltensexperimenten mit Seehunden konnte vor einigen Jahren gezeigt werden (Dehnhardt, Muck, Bleckmann 1998), dass die Barthaare von Seehunden, die Vibrissen, dem Tier außergewöhnliche Fähigkeiten ermöglichen. Die Seehunde können alleine mit Hilfe ihres Vibrissenapparates hydrodynamische Spuren im Wasser wahrnehmen. Diese äußerst empfindliche Wahrnehmung von Wirbeln wird dadurch ermöglicht, dass an der Seehundvibrisse im Gegensatz zu anderen, zylinder- oder ellipsoidförmigen Barthaaren, keine eigenen Nachlaufwirbel entstehen, die üblicherweise von der Ablösung einer Wirbelstraße herrühren würden. Eine Übersicht über die biologischen Beobachtungen, die mechanischen und die strömungsphysikalischen Phänomene an der Vibrisse findet sich in Hanke et al. 2010.

Der Mechanismus, der zur Reduktion der primären Nachlaufwirbel führt, wurde zunächst an Vibrissen im Original mit Hilfe von Stereo- $\mu$ PIV untersucht. Zur Bestimmung des instationären dreidimensionalen Strömungsfeldes wurden dann von Witte et al. (2012) numerische Simulationen durchgeführt. Auf diesen Ergebnissen aufbauend konnten die Nachläufe grö-

ßenskalierter Modellkörper mit Vibrissenstruktur und schließlich vibrissenähnliche Konturen für die technische Anwendung im Windkanal mit 3D-LDA vermessen werden.

### Die Wirbelstruktur hinter einer Seehundvibrisse

Bereits bei einer Betrachtung des zeitgemittelten Strömungsfeldes, dargestellt in Abbildung 1, zeigen sich die wesentlichen Unterschiede des Vibrissennachlaufs zum Zylindernachlauf. Auffällig ist zunächst die Variation der Ablöselinie in z-Richtung. Sehr späte Ablösung im Bereich der schlanken Vibrissenabschnitte wechselt sich mit früherer Ablösung an stumpfen Vibrissenabschnitten ab. Im Nachlauf der schlanken Abschnitte tritt nahezu kein Rezirkulationsgebiet auf, im Gegensatz dazu erstreckt sich das Rezirkulationsgebiet im stumpfen Abschnitt bis  $x/D = 3$ . Damit tritt eine deutliche Verlängerung des Rezirkulationsgebiets im Vergleich zum Zylindernachlauf auf.

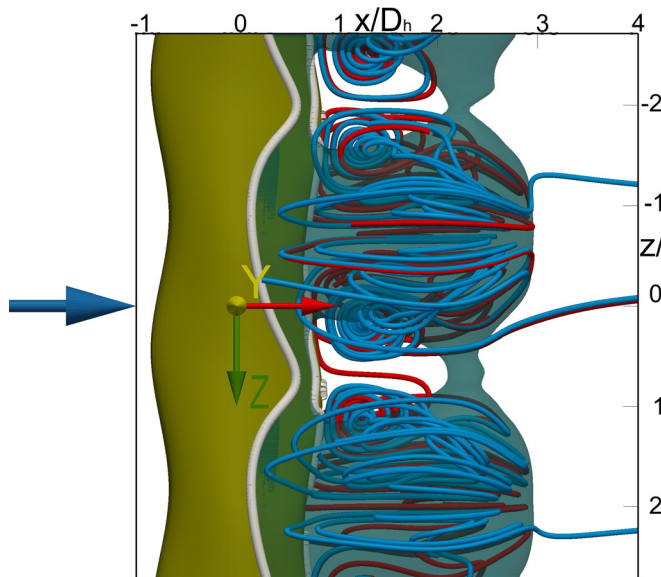


Abbildung 1: Zeitgemittelter Nachlauf der Modellvibrisse  $Re = 500$  (numerisch). Isofläche  $u/U_\infty = 0$  (grün). Ablöselinie auf der Oberfläche (grau), Stromlinien (blau, rot) (Witte et al. 2012).

Die zeitaufgelösten, dreidimensionalen Geschwindigkeitsfelder der numerischen Simulation ermöglichen nun eine Analyse der Wirbelstruktur. Dabei wird das Geschwindigkeitsfeld zunächst in orthogonale Karhunen-Loève Moden zerlegt. Mit Hilfe der dem primären Wirbelfeld zugeordneten Moden 1 und 2 könnten dann die Zeitschritte aus der Simulation in einer Phasenmittelung zusammengeführt werden. Zur Verdeutlichung des Verlaufs der Wirbel wurden die Kernlinien der Wirbel nach Sujudi und Haines (1995) in diesem in 16 Phasen gemittelten Geschwindigkeitsfeld extrahiert. Ausgangspunkt des Verfahrens ist die Theorie kritischer Punkte, die erstmals im Bereich der Strömungsmechanik durch Helman und Hesselink (1989 und 1991) für die Visualisierung und Analyse von Strömungsstrukturen angewendet wurde. Die Kernachse eines Wirbels ist durch einen spiralförmigen Verlauf dicht benachbarter Stromlinien gekennzeichnet. Ein spiralförmiger Verlauf der Stromlinien wird durch die Eigenwertverteilung des Geschwindigkeitsgradiententensors identifiziert, bei der es einen realen und zwei konjugiert komplexe Eigenwerte gibt. Der zum realen Eigenwert gehörende Eigenvektor zeigt dabei in Richtung der Wirbelkernachse. Die Kernachse selbst wird durch den „parallel vector operator“-Formalismus extrahiert, den Peikert und Roth (1999) vorgeschlagen haben.

In Abbildung 2 sind die Wirbelkerne dargestellt, wie sie zu zwei Phasenzeitpunkten im phasengemittelten Geschwindigkeitsfeld extrahiert wurden. Deutlich ist in Phase 1/16 die Schlaufenbildung bei  $x/D_h = 1$  zu erkennen, die hinter den stumpferen Vibrissenabschnitten

abwechselnd in z-Richtung ein Segment des Primärwirbels der linken Wirbelstraßenseiten und eines der rechten aufreißt, ohne dass diese verbunden sind. Jede Schlaufe läuft in zwei Enden aus, die zunächst in y-Richtung die Wirbelstraßenseite wechseln. Dies findet gerade am Übergang zwischen den stumpfen zu den schlanken Vibrissenabschnitten statt und ist vergleichbar mit dem Kopfwirbel bei der Überströmung eines Zylinderstumpfes. Im weiteren Verlauf sind die Enden der Schlaufe dann in der Art von Sekundärwirbeln x-Richtung stromab gebogen. Bei der Betrachtung von Phase 4/16 fällt auf, dass die Kopf- und Sekundärwirbelteile mit ihren y- und x-Abschnitten ortsfest bleiben, während sich die z-orientierten Abschnitte ablösen und stromab auflösen, vergleichbar mit den Primärwirbeln im Zylindernachlauf. In den Phasen 8/16 bis 16/16 läuft der Vorgang spiegelbildlich zur x-z Ebene ab. In allen Phasen bleibt der Bereich hinter den schlanken Vibrissenabschnitten frei von Wirbelbildung, es können sich keine durchgehenden Längswirbel wie im Zylindernachlauf ausbilden.

Diese Kombination aus stumpfer und schlanker Körperumströmung mit Primär-, Sekundär- und Kopfwirbelelementen hat Auswirkungen auf die Druckverteilung an der Vibrisse. Insgesamt ist die Wirbelbildungszone im Vergleich zum Zylindernachlauf in Stromabrichtung verschoben. Dadurch ist der Unterdruck im Rezirkulationsbereich weiter von der Körperoberfläche entfernt. Die von den Primärwirbeln verursachten Querkräfte sind deshalb verringert. Gleichzeitig kommt es bei der Vibrisse, jedoch nicht bei allen vibrissenähnlichen Strukturen, zum Phasenwechsel der Primärwirbelabschnitte im Verlauf der z-Richtung, wodurch sich die entstehenden Querkräfte in der Summe ausgleichen. Schließlich fällt insgesamt die Bildung von Längswirbeln aufgrund der Unterbrechung an den schlanken Vibrissenabschnitten deutlich schwächer aus, was die Querkräfte ein weiteres Mal reduziert. Insgesamt wird eine Reduzierung der dynamischen Querkräfte an der Vibrisse um über 80 % erreicht.

Der Mechanismus beruht also entscheidend auf der dreidimensionalen Formgebung, die eine dreidimensionale Wirbelstruktur hervorruft, die ein längeres Rezirkulationsgebiet als der Zylindernachlauf aufweist, Kraftwirkungen auf die Struktur durch einen Phasenversatz der ablösenden Wirbelsegmente ausgleicht und im Nachlauf schnell zerfällt.

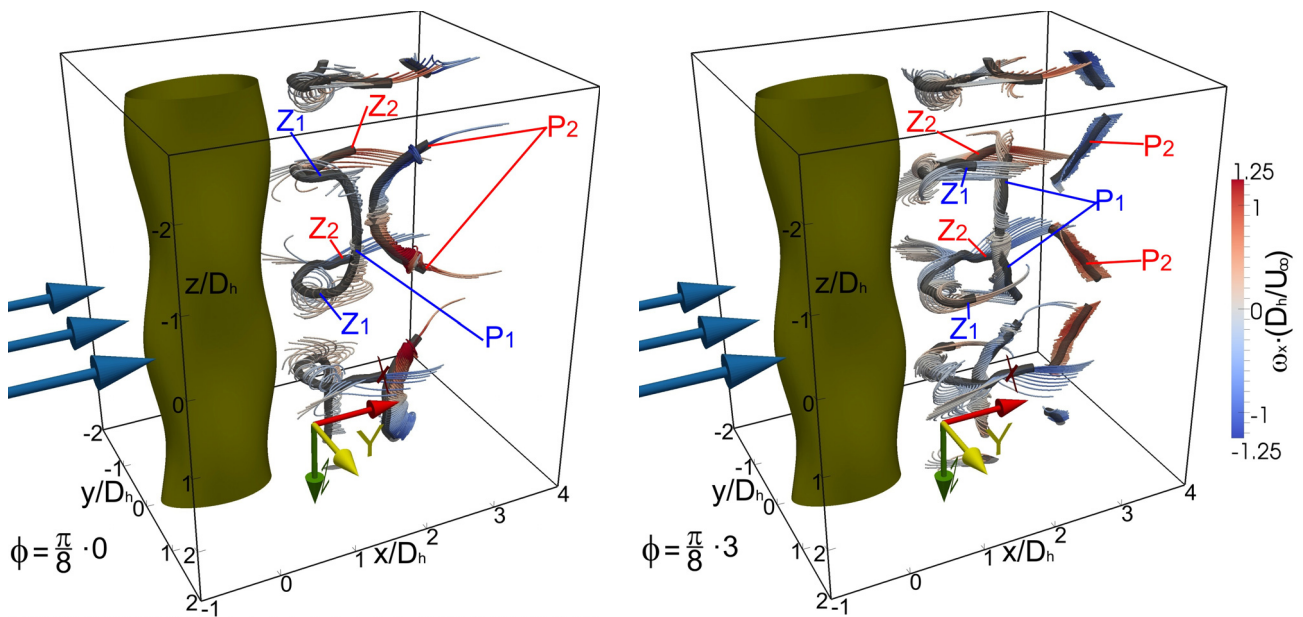


Abbildung 2: Modellvibrisse,  $Re = 500$ , Phasenmittelung auf Basis der POD-Geschwindigkeitsmoden 1 und 2 aus numerischen Simulationsdaten, Phasen  $1/16$  und  $4/16$ . Extrahierte Wirbelkernlinien und Stromlinien.

### Übertragbarkeit auf technische Strukturen

Für Anwendungen, die im Maßstab der Originalvibrisse stattfinden, kann von einer Übertragbarkeit der Reduktion der Schwingungs- und Reibungskräfte unmittelbar ausgegangen werden. Damit sind beispielsweise besonders empfindliche Schwingungs- oder Turbulenzsensoren im Bereich der Strömungsmesstechnik denkbar. Mit Hilfe solcher Sensoren wäre es mit wenig Aufwand möglich, alle Arten von Wirbelbewegungen in Wasser quantitativ zu erfassen, bis hin zur Bestimmung von Turbulenzspektren, wie sie in der Ozeanografie von Interesse sind.

Eine größere wirtschaftliche Bedeutung haben Anwendungen, die durch die Übertragung der Vibrisseneigenschaften auf andere Maßstäbe erschlossen werden. Zu diesem Zweck wurden die Strömungseigenschaften von Vibrissenmodellen bei höheren Reynoldszahlen ermittelt. Desweiteren wurden Varianten der Vibrissengeometrie untersucht, um festzustellen, welchen Einfluss die Modulationslänge, die Anstellwinkel der Ellipsen und die Halbachsenverhältnisse auf die gewünschten Strömungseigenschaften haben.

### Einfluss der Reynoldszahl

Die Einflüsse der Reynoldszahl auf die Eigenschaften der Umströmung von Vibrissenkonturen wurde an einem geometrisch im Faktor 22:1 skalierten Modell im Windkanal untersucht (Birkner, Witte, Brede, Leder 2010). Bei einer Reynoldszahl von 10.000 wurden mit Hilfe von 3D-LDA und Kraftwaagenmessungen das phasenaufgelöste dreidimensionale Geschwindigkeitsfeld, sowie die mittleren und dynamischen Kraftbeiwerte für Wiederstand und Querkraft bestimmt.

Diese Messungen ergaben ein eindeutiges Ergebnis. Es konnte festgestellt werden, dass, wie bei der Seehundvibrisse, eine im Vergleich zum Zylindernachlauf deutliche Reduzierung der turbulenten Schwankungsgrößen auftritt. Ebenso ist das Rezirkulationsgebiet vergrößert, die Strömungstopologie ist vergleichbar, siehe Abbildung 3.

Diese Ergebnisse konnten in Kraftwaagenmessungen im Windkanal auf den Reynoldszahlbereich 30.000 bis 80.000 erweitert werden, siehe Birkner, Brede, Dehnhardt, Leder (2012). Die Kraftmessungen zeigen eine Verringerung des Widerstandsbeiwertes um 45% und der dynamischen Querkräfte um 85% für den ganzen Reynoldszahlenbereich im Vergleich zum Zylinder. Damit konnte gezeigt werden, dass die reibungsreduzierenden und schwingungsunterdrückenden Eigenschaften der Vibrissenkontur auch auf größere Skalen übertragbar ist.

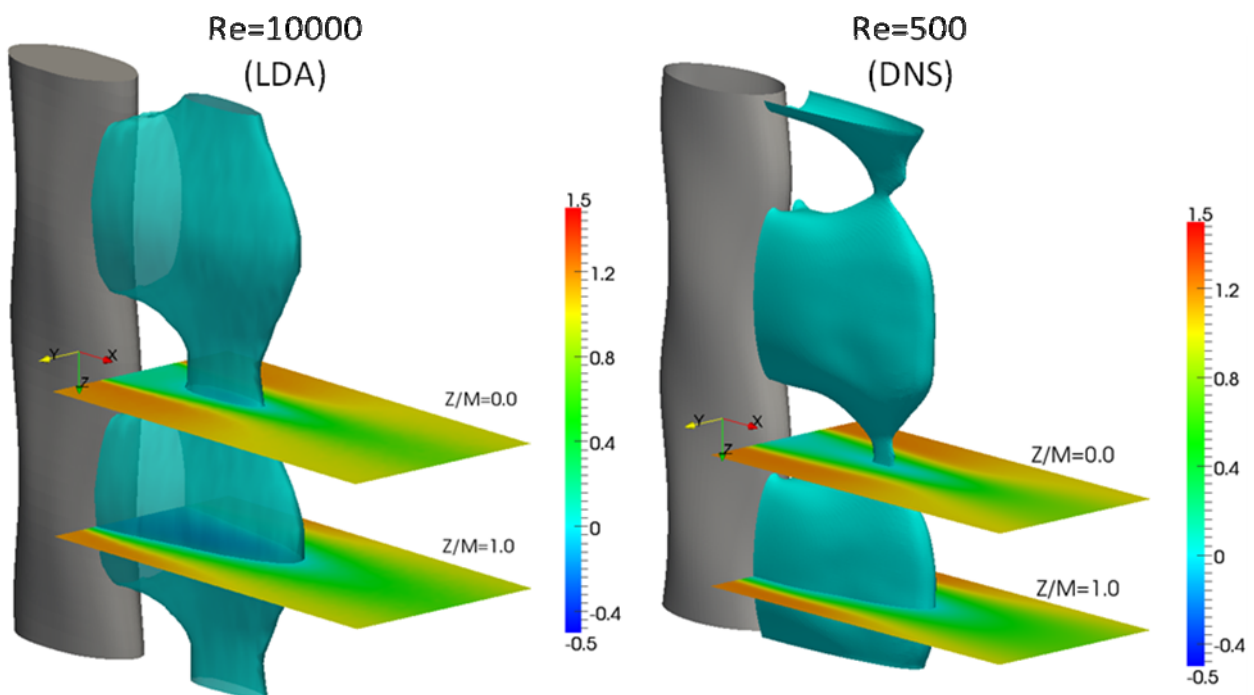


Abbildung 3 Rezirkulationsgebiet  $u = 0$  und mittlere Strömungsgeschwindigkeit  $u/U$  an der Vibrissenkontur bei  $Re = 10000$  und  $Re = 500$  (Birkner et al. 2010), zu den DNS Daten siehe auch Witte et al. (2012)

### Einfluss der Geometrieparameter

Die Einflüsse der Geometrieparameter der Vibrissenkontur auf das Strömungsfeld wurde an ebenfalls im Verhältnis 22:1 skalierten Modellen im Windkanal untersucht. Dabei kamen Time-Resolved Stereo-PIV und Kraftwaagenmessungen zum Einsatz. Damit konnten zum Einen das rekonstruierte phasenaufgelöste dreidimensionale Geschwindigkeitsfeld, sowie zum Anderen die mittleren und dynamischen Kraftbeiwerte für Widerstand und Querkraft bestimmt werden. Als Parameter wurden dabei die Modulationslänge, die Anstellwinkel und die Halbachsenverhältnisse der Ellipsengrundformen variiert.

Hinsichtlich des Anstellwinkels trat ein zunächst überraschendes Resultat zutage. Wird der Anstellwinkel der Ellipsengrundformen auf null reduziert, im Fall der sogenannten „planaren Vibrisse“, sinken noch einmal leicht die Werte für den Strömungswiderstand und dynamische

Querkraft im Vergleich zur originalen Vibrissenform. Durch Videobeobachtungen ist aber inzwischen bekannt, dass am Seehund die Barthaare in der Anstellung zur Umströmung so positioniert sind, dass nicht die Vibrissenachse senkrecht angeströmt wird, sondern im Mittel die Strömung parallel zu der langen Achse der Ellipsengrundform erfolgt. Das bedeutet, dass in der technischen Anwendung, in der die Anströmung senkrecht zur Achse erfolgt, die Ellipsengrundformen tatsächlich ohne Anstellwinkel ausgerichtet werden müssen, um den Verhältnissen am Seehundbarthaar zu entsprechen. In der Folge wurden deshalb die weiteren Untersuchungen an planaren Vibrissenkonturen ausgeführt.

Bei einer Variation der Modulationslänge wurden nur geringe Änderungen festgestellt. Bei dem Vergleich zwischen Vibrissenkonturen mit der halben und der originalen Modulationslänge ändern sich die widerstandsvermindernden und schwingungsunterdrückenden Eigenschaften nur wenig. Bei der halben Modulationslänge treten im Bereich der schlanken Ellipse keine eigenen dominanten Ablösefrequenzen auf, wie an der Originalvibrisse, da offensichtlich der Abstand zum Nachlauf der stumpferen Ellipse zu gering ist.

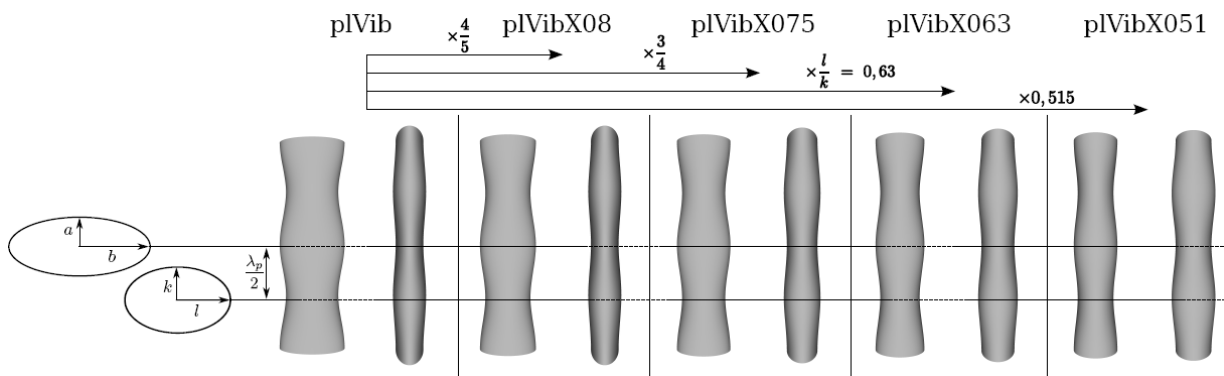
Für die technische Anwendung besonders aufschlussreich ist die Untersuchung verschiedener im Maßstab 22:1 skalierten Vibrissenkonturen, bei dem das Halbachsenverhältnis der Ellipsengrundformen immer weiter gegen eins skaliert wird, die Ellipsen also immer weniger schlank ausfallen, siehe Abbildung 4. Als Maß dafür wird die Skalierung der Halbachsenverhältnisse angegeben, mit 1 für die Originalvibrisse bis 0,51 für das stumpfeste Modell. In der Messung mit der Kraftwaage ergibt sich das naheliegende Ergebnis, dass die widerstandsvermindernden und schwingungsunterdrückenden Eigenschaften mit zunehmender Stumpfheit immer geringer werden.

Gleichzeitig wurden diese Konturformen auch bei einer Queranströmung, also bei Anströmung senkrecht zur langen Achse der Ellipsengrundformen untersucht. Dieser Fall wurde berücksichtigt, um die Auswirkung einer variablen Anströmrichtung in einer technischen Anwendung abschätzen zu können, wobei eine Queranströmung den ungünstigsten Fall darstellt. In Queranströmung zeigt sich, dass die schlankeste Grundform, die der planaren Vibrissenkontur, die geringsten reibungsreduzierende und schwingungsunterdrückenden Eigenschaften aufweist. Tatsächlich liegen die gemittelten Werte für  $c_W$  und  $c_A'$  sogar über dem eines Zylinders. Bei einer Verringerung der Halbachsenverhältnisse kommt es dann zu einer Verbesserung dieser Eigenschaften bis für einen Skalierungsfaktor 0,63 das Niveau eines Zylinders erreicht wird. In diesem Fall sind dann beide Anströmrichtungen mit im Vergleich zum Zylinder günstigeren Eigenschaften möglich. Da die Queranströmung den ungünstigsten Fall abdeckt kann so gezeigt werden, dass für Skalierungsfaktoren von 0,63 und kleiner bei variabler Anströmrichtung niedriger Widerstands- und Schwingungsbeiwerte erreicht werden, als bei einem vergleichbaren Zylinder auftreten würden.

Damit qualifizieren sich die Vibrissenkontur für technische Anwendungen mit und die abgestumpfte vibrissenähnliche Kontur für Anwendungen ohne Vorzugsrichtung. Sie stellen so einen Musterfall der passiven Strömungsbeeinflussung durch biomimetische Formgebung dar.

## **Dankesworte**

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die Förderung der Forschung im Rahmen des Schwerpunktprogramms 1207 und dem Departement Maritime Systeme der Interdisziplinären Fakultät der Universität Rostock für die Stipendiatenförderung.



Prüfkörper	planare Vibrisse	pIVibX08	pIVibX075	pIVibX063	pIVibX051
Skalierung	1	0,8	0,75	0,63	0,515
Halbachsenverhältnis $\lambda_1=a/b$	2,38	1,90	1,78	1,50	1,225
Halbachsenverhältnis $\lambda_2=k/l$	1,59	1,27	1,19	1,0	$b/a = 0,816$
hydr. Durchmesser $D_h$ [mm]	$\approx 30$	30	30	30	30
Periodenlänge $\lambda_p/D_h$	2,65	2,67	2,67	2,67	2,67

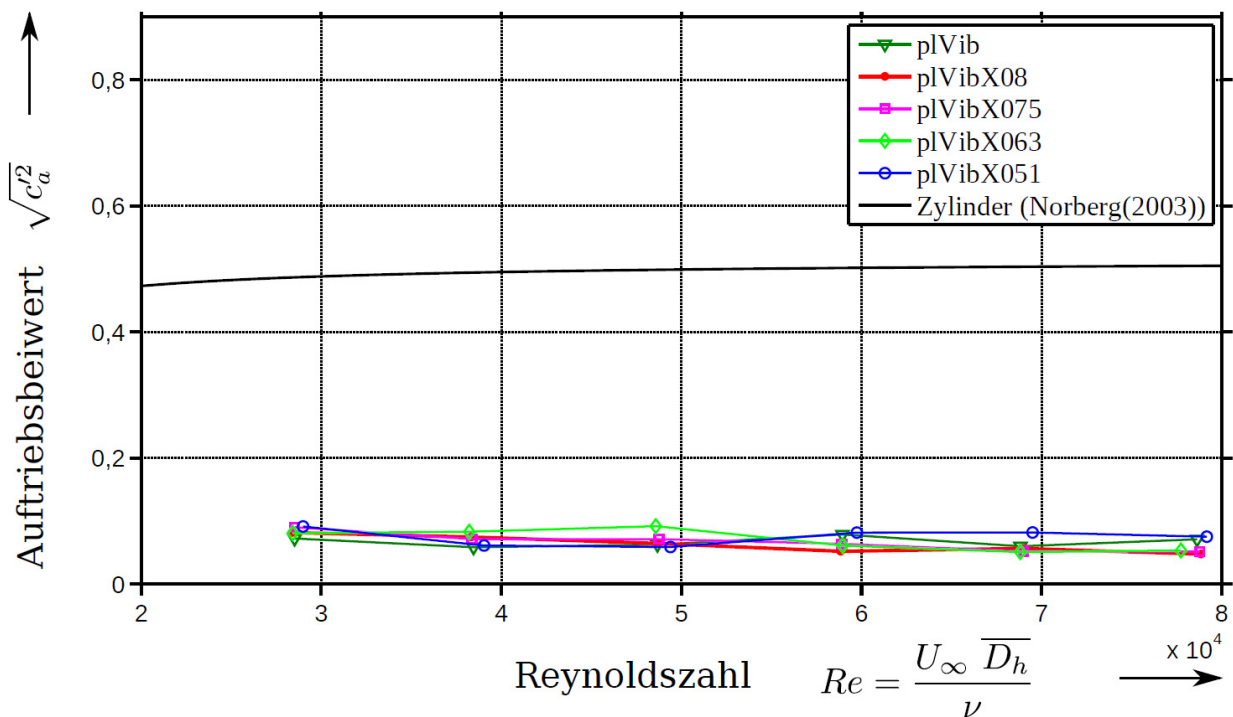


Abbildung 4 : Dynamische Auftriebsbeiwerte für vibrissenähnliche Körper bei einer Skalierung der Ellipsengrundform (Birkner et al. 2012)

## Literatur

- Birkner, T.; Witte, M.; Brede, M.; Leder, A. (2010) Strömungsmechanische Untersuchungen im Nachlauf eines Vibrissenmodells bei hohen Reynoldszahlen. In: Egbers, C.; Ruck, B.; Leder, A.; Dopheide, D. (Eds.): Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik. 18. Fachtagung, 7. - 9. September 2010, Cottbus. Dt. Ges. für Laser-Anemometrie, Karlsruhe, pp. 10.1-10.7, ISBN 978-3-9805613-6-5
- Birkner, T.; Brede, M.; Dehnhardt, G.; Leder, A. (2012): Experimentelle Untersuchung im Nachlauf vibrissenähnlicher Strukturen mit variierenden Geometrieparametern. In: Leder, A.; Brede, M.; Ruck, B.; Dopheide, D. (Eds.): Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik. 20. Fachtagung, 04. - 06. September 2012, Rostock. Dt. Ges. für Laser-Anemometrie GALA e. V, Karlsruhe, pp. 36.1-36.8, ISBN 978-3-9805613-8-9
- 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. et al. (2010): Harbor seal vibrissa morphology suppresses vortex-induced vibrations. *Journal of Experimental Biology*, **213** (15), pp. 2665–2672, doi: 10.1242/jeb.043216
- Helman, J.; Hesselink, L. (1989): Representation and Display of Vector Field Topology in Fluid-Flow Data Sets; *Computer* 22(8): 27-36.
- Helman, J. L.; Hesselink, L. (1991): Visualizing Vector Field Topology in Fluid-Flows; *IEEE Computer Graphics and Applications* 11(3): 36-46.
- Peikert, R.; Roth, M.; (1999): The "Parallel Vectors" Operator - A Vector Field Visualization Primitive; *Proceedings of IEEE Visualization '99*: 263-270.
- Sujudi, D.; Haines, R. (1995): Identification of Swirling Flow in 3-D Vector Fields; *American Institute of Aeronautics and Astronautics*. Cambridge, MA, Massachusetts Institute of Technology: 8.
- Witte, M.; Hanke, W.; Wieskotten, S.; Miersch, L.; Brede, M.; Dehnhardt, G.; Leder, A. (2012): On the Wake Flow Dynamics behind Harbor Seal Vibrissae - A Fluid Mechanical Explanation for an Extraordinary Capability. In: Tropea, C.; Bleckmann, H. (Eds.): *Nature-Inspired Fluid Mechanics (Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design, 119)*: 271–289, ISBN 978-3-642-28301-7
- Witte, M. (2013): Strömungsmechanische Analysen zur instationären Umströmung von Seehundvibrissen und Kreiszyklindern, Dissertation Universität Rostock, Kühlungsborn, ISBN 978-3-981-34444-8