

Verringerung der dynamischen Kräfte im Nachlauf stumpfer Körper bei beliebiger Queranströmung durch die neue biomimetische SpirElly Formgebung

Reduction of the dynamic forces on bluff bodies in arbitrary cross-flow by the biomimetic SpirElly design

Thomas Birkner, Martin Brede, Guido Dehnhardt^{*)} und Alfred Leder

Universität Rostock

Lehrstuhl für Strömungsmechanik, Albert-Einstein-Str. 2

*) Lehrstuhl für sensorische und kognitive Ökologie, Albert-Einstein Str. 3

dynamische Kräfte, Strömungswiderstand, stumpfer Körper, PIV, Seehundvibrisse
dynamic force, drag, bluff body, PIV, seal vibrissa

Zusammenfassung

In kombinierten experimentellen und numerischen Strömungsuntersuchungen konnte gezeigt werden (Hanke et al. 2010, Witte et al. 2012), dass die Barthaare von Seehunden, die Vibrissen, in der Lage sind, eine periodische Wirbelablösung weitgehend zu unterdrücken. Dieser Effekt wurde erfolgreich auf vibrissenähnliche Strukturen bei großen Reynoldszahlen übertragen. Abgeleitet von vibrissenähnlichen Strukturen wird eine Struktur vorgeschlagen, die den Effekt der Reduktion periodischer Wirbelstrukturen unabhängig von der Anströmung aufweist. Der vorgeschlagene Körper, SpirElly, basiert auf einem elliptischen Querschnitt, dessen Achse mit der Spannrichtung rotiert.

Für diesen Körper konnte durch volumenrekonstruierte POD-zerlegte TR-PIV-Messungen und durch Kraftmessungen gezeigt werden, dass die Eigenschaften des Nachlaufs vibrissenähnlicher Körper, das Wirbelfeld dreidimensional zu verformen und den Reibungsbeiwert, sowie den Beiwert der dynamischen Querkraft erheblich zu verringern, erhalten bleiben. Zusätzlich sind nur beim SpirElly-Körper diese Effekte unabhängig von der Richtung der Queranströmung.

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.

Die spiralförmige Vibrissenstruktur SpirElly

Die Kontureigenschaften des SpirElly-Modells basieren auf den Geometrieparametern der stumpfen vibrissenähnlichen Struktur (pIVibhX051) der aus abwechselnd längs und quer angeströmten Ellipsenquerschnitten zusammengesetzt wurde (Birkner et al. 2012). Die Neuerung besteht nun darin, dass durch einen spiralförmigen Übergang, der schon die Scrouton-Wendel (Scrouton und Walshe, 1957) und den „bumpy cylinder“ (Owen et al. 2001) zur Richtungsunabhängigkeit verholfen hat, eine wellige Oberflächenkontur erzeugt wird, die aus allen Richtungen die gleiche Form aufweist. Dadurch kann davon ausgegangen werden, dass für lange zylindrische Körper mit einer Vielzahl von Modulationen die Anströmrichtung keine Rolle spielt. Die Untersuchungen dieser Geometrievariante erfolgten sowohl experimentell mit TR-PIV, als auch numerisch durch eine Grobstruktursimulation.

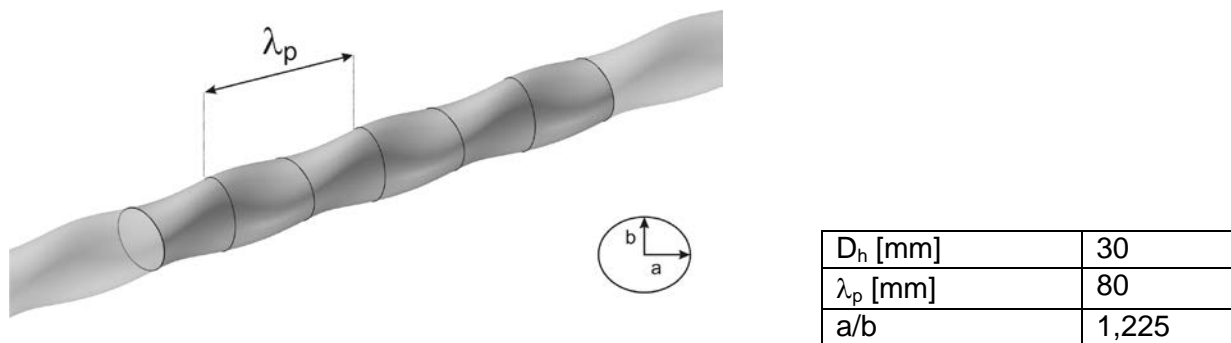


Abbildung 1: Geometrie des vibrissenähnlichen Körpers „SpirElly“

Versuchsanordnung des Stereo-TR-PIV-Systems

Die gefertigten Modelle wurden zur Ermittlung der jeweiligen Strömungscharakteristik in der Messstrecke des Windkanals so montiert, dass eine störungsfreie, homogene und turbulenzarme Anströmung realisiert werden konnte. Zusätzlich wurden Endscheiben angebracht, die die Störungen der Strömungen minimieren, die durch die Umströmung eines freien Endes zu erwarten wären.

Die PIV-Messungen wurden in stereoskopischer Anordnung mit je einer Kamera auf jeder Seite des Laserlichtschnitts durchgeführt. Für jedes Modell wurden zwei Messkampagnen mit unterschiedlicher Ausrichtung des Laserlichtschnitts durchgeführt. Die primäre Versuchsanordnung ist in Abbildung 2 schematisch dargestellt. Diese Versuchsanordnung ermöglicht jedoch keine Rückschlüsse auf die vertikale Wechselwirkung der Nachlaufstrukturen, weshalb zusätzliche Messungen durchgeführt wurden, in denen die Messebene orthogonal zur Primärmessung, also in der X-Z-Ebene, lag.

Die Auswertung der Partikelbilder erfolgte mit einem adaptiven Korrelationsverfahren mit einer Fenstergröße von $32 \times 32 \text{ px}^2$ und 50% overlap. Die so ermittelten planaren Geschwindigkeitsfelder jeder Kamera werden über die zuvor ermittelten Kalibrierfaktoren miteinander kombiniert, so dass dreikomponentige, instantane Geschwindigkeitsfelder entstehen. Dieses Verfahren wurde für alle Modellkonfigurationen über einer Periodenlänge λ_p in mehreren Messebenen mit konstantem Abstand Δz durchgeführt, um die dreidimensionale Effekte erfassen zu können. Die gesamten PIV-Daten aller Ebenen einer Reynoldszahl wurden mit Hilfe der volumenrekonstruierenden POD-Analyse verarbeitet (Jensch et al. 2009).

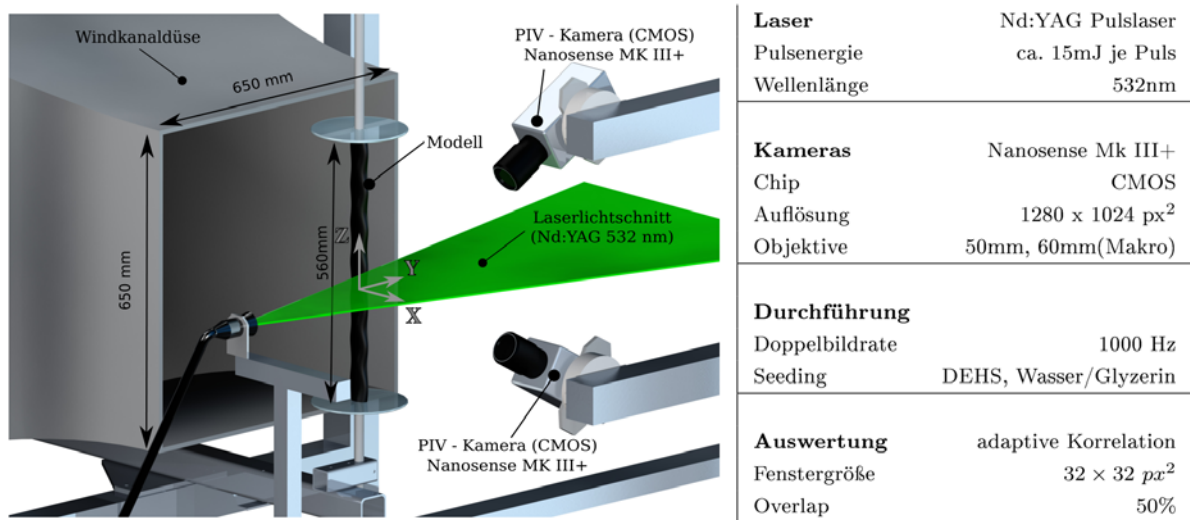


Abbildung 2 Versuchsanordnung des TR-PIV Systems

Instantane Nachlaufstrukturen

Die Analyse der Wirbelstrukturen im Nachlauf des spiralförmigen Ellipsenzylinders bestätigt die zuvor aus den mittleren Nachlaufstrukturen gewonnenen Vermutungen. Abbildung 3 zeigt einen Schnappschuss der durch das Q-Kriterium $Q \cdot (D_h/U_\infty)^2 = 1,5$ dargestellten Wirbelsysteme aus der LES-Simulation. Linksseitig werden diese in der Draufsicht mit denen des Referenzzyllinders verglichen. Es ist deutlich zu erkennen, dass sich im Nachlauf, wie bereits festgestellt wurde, die primären Strukturen deutlich später ausbilden als im Vergleichsfall. Jedoch sind im Gegensatz zur Vibrissenumströmung Ähnlichkeiten zum periodischen Nachlauf des Kreiszyllinders erkennbar. Dieser fällt aber wesentlich ungleichförmiger aus. Auf der rechten Seite sind dann dieselben Strukturen in der Seitenansicht dokumentiert. Einerseits ist dabei besonders auffallend, dass die Primärwirbel über einer Periodenlänge λ_p gleicher Weise gekrümmt sind, wie im Nachlauf der Vibrissenmodelle. Andererseits ist auch hier kein Phasenversatz der Wirbelformationen festzustellen.

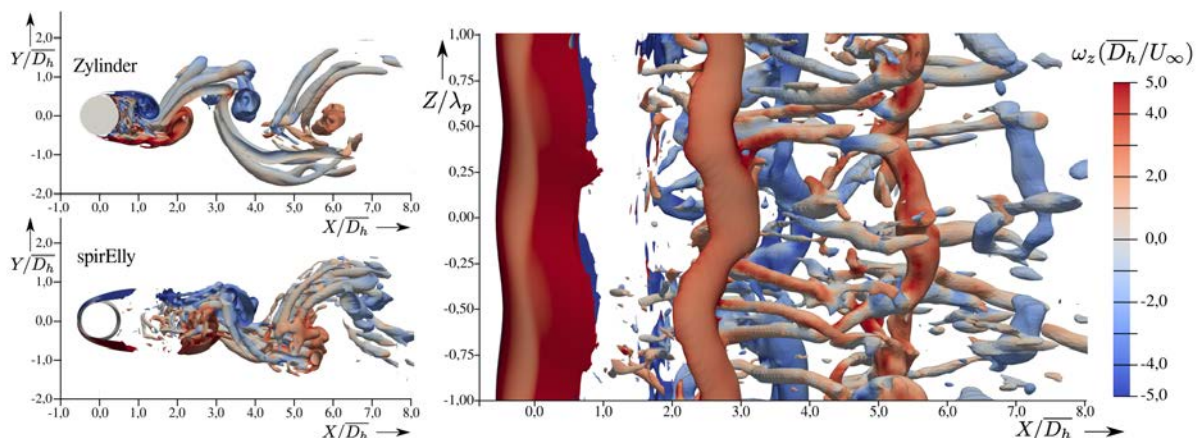


Abbildung 3: Vergleich der instantanen Nachlaufstrukturen $Q \cdot (D_h/U_\infty)^2 = 1,5$ von Zylinder und SpirElly in der Draufsicht (links) und Darstellung der Wirbelformationen in der Seitenansicht (rechts) ; ($Re_{Dh}=10.000$, LES)

Dieses Strömungsverhalten ist auch aus der POD-Analyse der mittels PIV gewonnenen instantanen Strömungsfelder zu extrahieren. Abbildung 4 zeigt die volumenrekonstruierte Verteilung der, die Primärwirbelsysteme repräsentierenden, ersten beiden Moden. Auch hier ist auf den ersten Blick kein Unterschied zu den Ergebnissen der Modelle der vorherigen Kapitel unter optimaler Anströmung festzustellen, da die rekonstruierte Modenkonfiguration ebenfalls entlang der Z-Achse ungleichmäßig ausgeprägt ist. Auf der anderen Seite offenbart das dazugehörige Eigenwertspektrum (Abb. 5), dass die erste und zweite Mode zusammen, wie beim stumpfen Vibrissenkörper, einen Anteil von ca. 50% an der gesamten Turbulenzenergie besitzen.

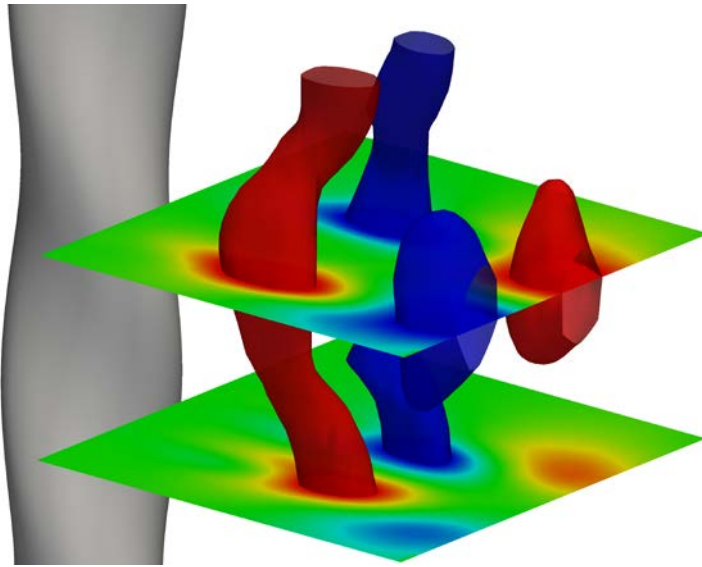


Abbildung 4: SpirElly, $Re = 40.000$, Isoflächen $\Phi = \pm 0,4$ der POD-Mode 1 für die Geschwindigkeitskomponente u , aus TR-PIV Daten (Birkner 2013)

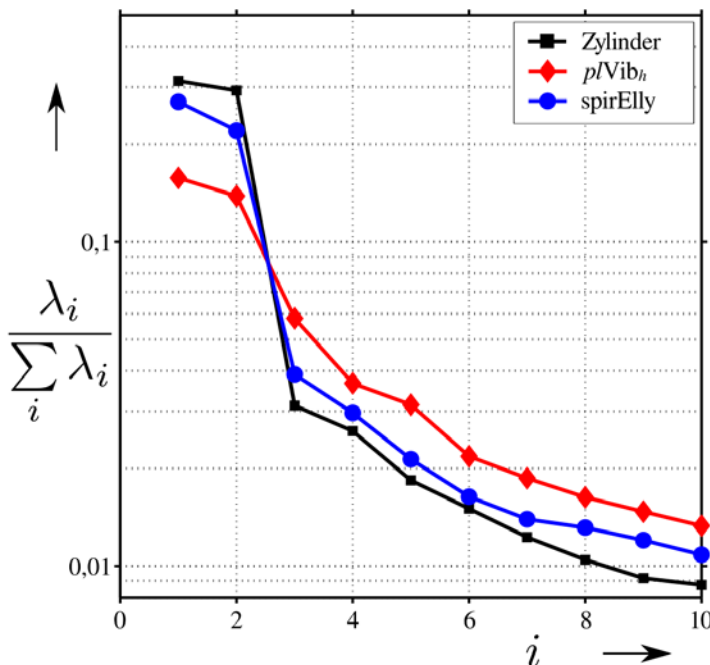


Abbildung 5: Vergleich der normierten Eigenwertspektren aus der POD-Analyse ($Re=40.000$, PIV)

Widerstands- und Auftriebskräfte

Die Übereinstimmungen der Strömungseigenschaften der Modelle mit kontinuierlichem und spiralförmigem Querschnittübergang spiegeln sich ebenfalls in den Widerstands- und Auftriebsbeiwerten wieder. So ist bei den Widerstandskräften in Abbildung 6 eine Minderung bezüglich der Referenzwerte des Kreiszylinders von ca. 20% festzustellen. Diese Widerstandsminderung ist aufgrund der Quasi-Axialsymmetrie ebenfalls unabhängig von der Richtung der Anströmung. Im Vergleich mit den etablierten Geometrieformen zur Unterdrückung wirbelinduzierter Schwingungen von Owen et al. (2001) und Lam et al. (2004a) ist ersichtlich, dass der spiralförmige Ellipsenzylinder deutlich bessere Ergebnisse bezüglich des Widerstandsbeiwertes liefert, als ein Kreiszylinder mit sinusförmiger Variation des Durchmessers. Die Ergebnisse sind eher vergleichbar mit denen des „bumpy-cylinders“, jedoch sind diesbezüglich leicht erhöhte Werte festzustellen. Der in Abbildung 7 dargestellte Reynoldszahlverlauf der dynamischen Auftriebsbeiwerte dokumentiert, eine Reduktion der dynamischen Kraftanteile um mehr als 80%. und ist damit mit den bisher untersuchten Modellkonfigurationen der vibrissenähnlichen Körper absolut vergleichbar. Somit unterdrückt diese Konturform unabhängig von den Verhältnissen in der freien Anströmung die wirbelinduzierte Schwingungsanregung.

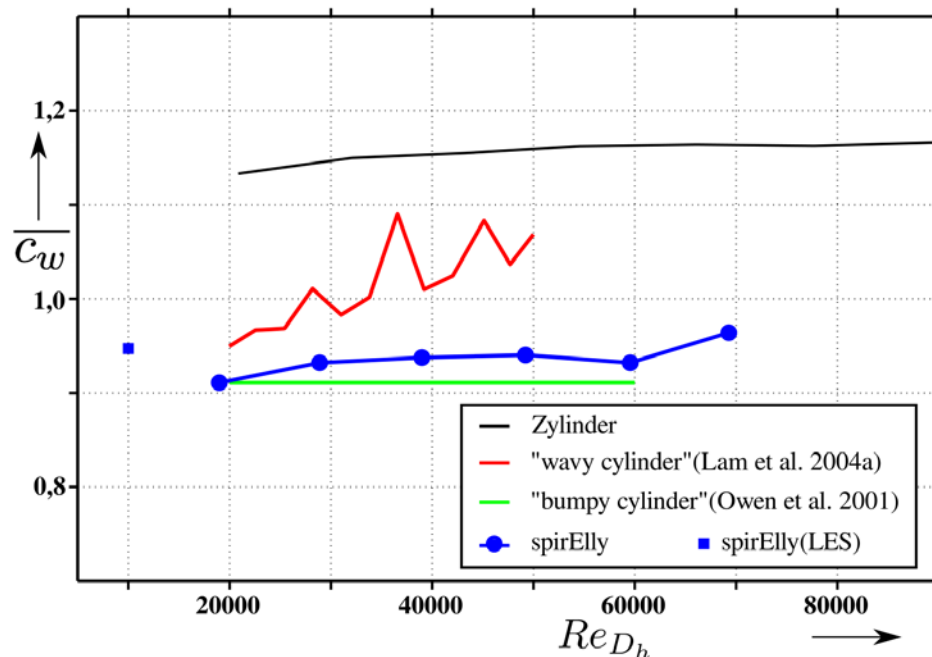


Abbildung 6: Vergleich der Widerstandsbeiwerte

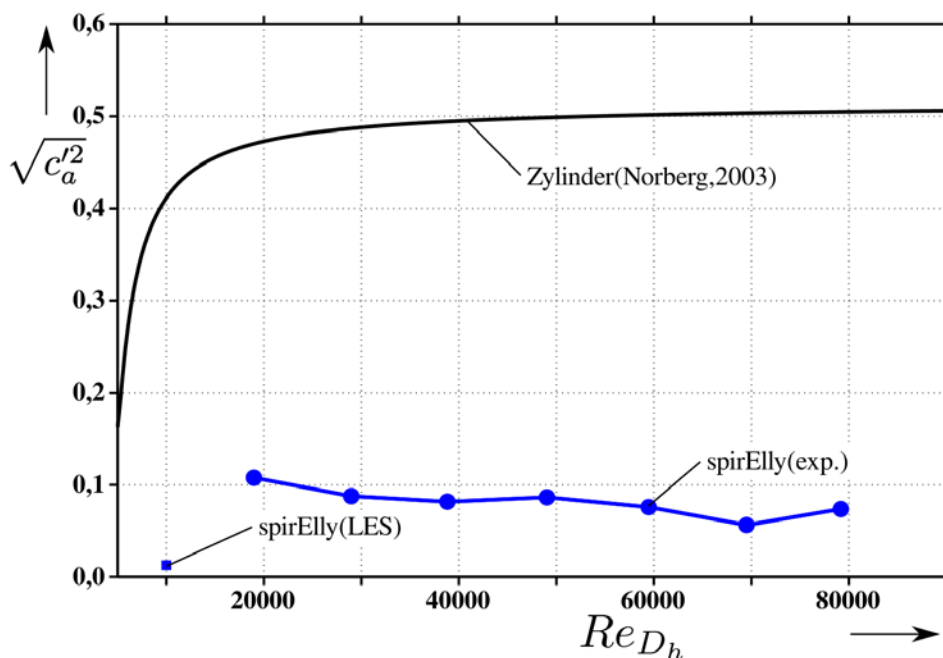


Abbildung 7: Reynoldszahlabhängigkeit des dynamischen Auftriebsbeiwertes

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass durch den Ellipsenzylinder mit spiralförmiger Variation der Querschnittparameter die Zielstellung einer richtungsunabhängigen Oberflächenkontur mit widerstandsmindernden und schwingungsunterdrückenden Eigenschaften auf Basis der Seehundvibrisse erreicht wurde. In weiteren Messungen (Birkner 2013) wurde die Periodenlänge dieser Geometrie variiert. Dabei konnte gezeigt werden, dass eine für die technische Anwendung zu verändernde Periodenlänge ebenso wie bei der Vibrisse im Bereich von λ_p/D_h zwischen 2,6 und 4 kaum Veränderungen der Strömungseigenschaften und Fluidkräfte bewirkt.

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.

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, GALA e. V, Karlsruhe, pp. 36.1-36.8, ISBN 978-3-9805613-8-9
- Birkner, T. (2013): Reduktion strömungsmechanischer Kräfte durch bionisches Design der Oberflächenkontur quer angeströmter zylindrischer Körper. Dissertation, 26.09.2013, Universität Rostock
- Brede, M.; Birkner, T.; Witte, M.; Dehnhardt, G.; Leder, A. (2013): Dreidimensionale biomimetische Formgebung zur Verringerung von dynamischen Kräften an quer angeströmten stumpfen Körpern nach dem Vorbild der Seehundvibrisse. In: Kähler, C. J.; Hain, R.; Cierpka, C.; Ruck, B.; Leder, A.;

- Dopheide, D. (Eds.): *Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik*. 21. Fachtagung, GALA e. V, Karlsruhe, pp. 18-1 - 18-8, ISBN 978-3-9805613-9-6
- 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
- Jensch, M.; Hüttmann, F.; Brede, M.; Leder, A. (2009): Optical Measurements in the Wake of a Circular Cylinder of Finite Length at a High Reynoldsnumber. In: Hirschel, E. H.; Dobriloff, C.; Fujii, K.; Haase, W.; Leer, B.; Leschziner, M. A.; Nitsche, W.; Pandolfi, M.; Periaux, J.; Rizzi, A.; Roux, B. (Eds.): *Imaging Measurement Methods for Flow Analysis. Results of the DFG Priority Programme 1147 "Imaging Measurement Methods for Flow Analysis" 2003-2009*. Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 185–195, ISBN 978-3-642-01105-4
- Lam, K.; Wang, F. H.; Li, J. Y.; So, R. (2004a): Experimental investigation of the mean and fluctuating forces of wavy (varicose) cylinders in a cross-flow. *Journal of fluids and structures*, **19** (3), pp. 321–334
- Owen, J.; Bearman, P.; Szewczyk, A. (2001): Passive control of VIV with drag reduction. *Journal of fluids and structures*, **15** (3), pp. 597–606, doi: 10.1006/jfls.2000.0358
- Scruton, C.; Walshe, D. E. J. (1957): A means for avoiding wind-excited oscillations of structures with circular or nearly circular cross-section. National Physical Laboratory, Teddington, Middlesex. NPL aero report 335
- 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