

SCHLEPPVERSUCHE AN KÜNSTLICHEN, LUFT HALTENDEN OBERFLÄCHEN ZUR REIBUNGSREDUKTION AM SCHIFF

TOWING TESTS WITH ARTIFICIAL AIR RETAINING SURFACES FOR DRAG REDUCTION ON SHIPHULLS

Jan-Erik Melskotte, Martin Brede, Andreas Wolter, Wilhelm Barthlott¹ & Alfred Leder

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

¹ Universität Bonn, Nees-Institut für Biodiversität der Pflanzen, Venusbergweg 22, 53115 Bonn

Mikrofluidik, Bionik, funktionale Oberflächen, Schleppversuch
microfluidics, biomimetics, functional surfaces, towing experiment

Zusammenfassung

In verschiedenen Messungen an unter Wasser Luft haltenden Oberflächen konnte durch die μ PIV-Technik gezeigt werden, dass sich das Wasser am Übergang zur Luftschicht mit einer Geschwindigkeit deutlich größer Null bewegt (Brede 2008, Melskotte 2012). Dieser Eigenschaft wird makroskopisch die Fähigkeit zugesprochen, die Reibung zwischen Wassers und der Oberfläche deutlich zu reduzieren. Bisher konnte für eine Abschätzung der Reibungsreduktion nur der Geschwindigkeitsgradient in direkter Nähe zur Luftschicht und die Gleitgeschwindigkeit des Wassers an der Luftschicht herangezogen werden.

Nun konnten erstmals die Eigenschaften künstlicher, Luft haltender Oberflächen in einem Schleppversuch in Frischwasser auf die reibungsreduzierende Wirkung untersucht werden. Herzstück der Versuchsanlage sind zwei über ein Joch verbundene NACA-Flügelprofile mit jeweils ca. 0,5 m² nutzbarer Fläche. Die Schleppversuche finden an einem mit Linearmotoren getriebenem Schleppwagen am Lehrstuhl Strömungsmechanik der Universität Rostock statt. Die Messungen ergaben, dass durch die Beschichtung eines Versuchsprofils mit einer künstlichen, Luft haltenden Oberfläche, die Reibung des Profils im Wasser um rund 31 % gesenkt werden kann.

Einleitung

Unter Wasser Luft haltende, biologische Oberflächen sind in den Fokus der Forschung gelangt, da sie einerseits mit ihren besonders ausgeprägten hierarchischen Oberflächenstrukturen und der dadurch gehaltenen Luftschicht das Überleben des unter Wasser getauchten Schwimmpfarns *Salvinia* längere Zeit erhalten können; andererseits weil sie etwaige Gestaltungsansätze für eine dauerhafte Lufthaltung bei künstlichen Oberflächen aufzeigen. Während die bisher entwickelten technischen, superhydrophoben Oberflächen solch eine Luftschicht nur über einen vergleichsweise kurzen Zeitraum halten können, existieren in der Natur diverse Tier- und Pflanzenarten, die Luftschichten über Wochen und Monate zu halten vermögen (Barthlott 2010, Koch 2010). Es konnten die Strukturparameter der in der Natur für die langfristige Lufthaltung verantwortlichen Haarstrukturen identifiziert werden, die die Stabilität der Luftschicht unter

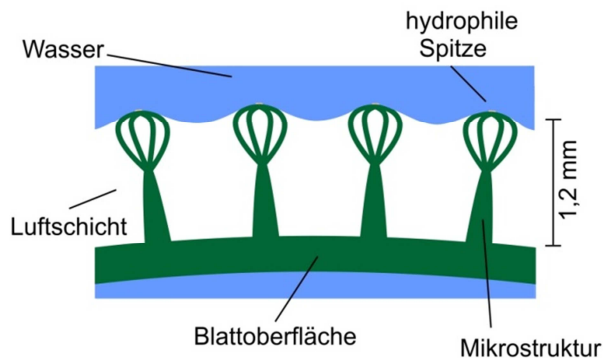


Abb. 1: Hydrophile Spitzen auf der Oberfläche eines *Salvinia molesta* Blattes (Schematischer Aufbau)

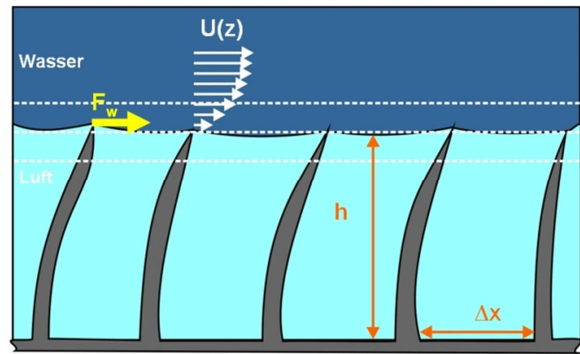


Abb. 2: Schematische Darstellung des Geschwindigkeitsverlaufes an einer Luft haltenden Oberfläche

verschiedenen Umgebungsbedingungen verbessern. Hydrophile Flächen an den Spitzen der ansonsten superhydrophoben Haare des Schwimmpfarns *Salvinia molesta* (Skizze siehe Abb. 1) fixieren die Luft-Wasser-Grenzfläche an diesen. Dieses "Salvinia-Effekt" (Barthlott 2010) genannte Prinzip stabilisiert die Grenzfläche bei Unterdruck und verhindert ein Ablösen von Luftblasen aus der Luftschicht. Es wurden erste prototypische, technische Oberflächen mit "Salvinia-Effekt" hergestellt, die bereits seit zweieinhalb Jahren eine Luftschicht unter Wasser halten. Zudem konnte in Strömungsversuchen gezeigt werden, dass sowohl die pflanzlichen Oberflächen als auch die Oberflächen des Rückenschwimmers *Notonecta glauca* in der Lage sind, bei höheren Geschwindigkeiten eine Luftschicht stabil zu halten. *Notonecta glauca* mit seinen Haaren auf zwei Strukturebenen hält diese sogar bis zu einer Strömungsgeschwindigkeit von 4,5 m/s.

Diese Erkenntnisse können in einer weiteren Entwicklungsphase zu einer dauerhaft Luft haltenden Schiffsbeschichtung führen. Bei einer konservativ geschätzten Reibungsreduktion von 10 % könnte eine solche biomimetische Schiffsbeschichtung die Emissionen in der globalen Seeschifffahrt um mehrere Millionen Tonnen Kohlenstoffdioxid reduzieren.

Künstliche, Luft haltende Oberflächen

Als biologische Vorbilder der künstlichen, Luft haltenden Oberflächen dienen die Schwimmblätter des tropischen Wasserfarns *Salvinia* und die Deckflügel, die so genannten Elytren, der Wasserwanze *Notonecta glauca*. Während bei den *Salvinia*-Arten auf der Blattoberfläche haarartige Strukturen mit einer Länge von ca. 300µm bis 2600µm und mittleren Dichten von rund 1,5 bis 26 Haaren/mm² zu finden sind, zeigt sich bei *Notonecta glauca* ein anderes Bild. Hier sind Haarstrukturen auf zwei Größenskalen zugleich vorzufinden, die einerseits als Microtrichia mit einer mittleren Höhe von 2,3µm und einer mittleren Dichte von 5,6*10⁶ Haaren/mm² und andererseits als gebogene Setae mit einer mittleren Länge von rund 90µm und einer mittleren Dichte von 120 Haaren/mm² benannt werden können. Für eine stabile Lufthaltung sind diesen Untersuchungen nach Haare bestimmter Größe, Länge, Dichte und Form entscheidend; dazu kommt die chemische Ausrüstung der Oberflächen, die wie im Fall von *Salvinia molesta* mit klar abgegrenzten hydrophilen und hydrophoben Bereichen zum "Salvinia-Effekt", der gezielten Anhaftung von Wasser zur Unterstützung der Lufthaltung, führt. Zur Übertragung der Strukturparameter auf technische Oberflächen wurden erste Versuche mit verschiedenartig hergestellten technischen Oberflächen in der Größenordnung weniger Quadratzentimeter durchgeführt. Diese sind hydrodynamisch hinsichtlich der Grenzflächeneigenschaften und der dynamischen Lufthaltung getestet.

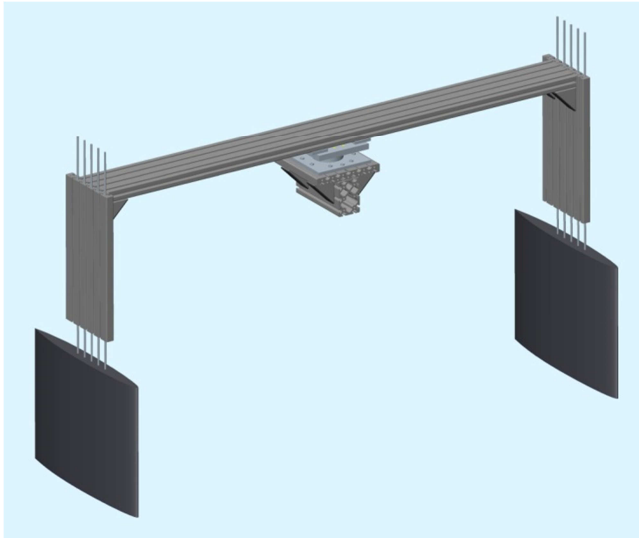


Abb. 3: Skizze des Messaufbaus mit Joch, zwei NACA-Profilen und zentraler Lagerung

hydrophile Spitzen, wie sie bei *Salvinia molesta* vorkommen. Dabei werden allerdings Probleme in Kauf genommen, die die Dauerhaftigkeit der Luftschicht, besonders bei hydrodynamischer Belastung, und die Dauerhaftigkeit der Hydrophobierung betreffen. Es ist bei diesen Oberflächen noch nicht möglich, über einen längeren Zeitraum die Luft an der Oberfläche zu halten.

Testeinrichtung und Versuchsdurchführung

Die Reibungsreduktion durch Luft haltende Oberflächen ist bisher immer aus Messungen des Geschwindigkeitsprofils im Wasser über der Luft-Wasser-Grenzfläche abgeleitet. Mit Ausnahme weniger Beispiele, die über Zunahmen des Volumenstroms die Reibungsreduktion durch superhydrophobe Oberflächen in dünnen Rohrleitungen indirekt bestimmt haben, gibt es bisher keine Messverfahren, die Flächen im Größenbereich mehrerer Quadratdezimeter direkt vergleichen können.

Die am Lehrstuhl Strömungsmechanik entworfene Kraftwaage soll der direkten Bestimmung der Reibungsreduktion durch Oberflächen dienen. Dabei werden zwei durch ein Joch verbundene, symmetrische Flügelprofile nach der Form NACA-16-009 parallel durch Frischwasser geschleppt. Das Joch ist zentral durch ein Kreuzrollenlager gestützt, die beiden Profile sind um dieses Lager frei drehbar. Bei gleichartiger Beschichtung der Profile ergibt sich ein Momentengleichgewicht an der Waage, es findet keine Auslenkung statt. Durch die Veränderung einer Profiloberfläche lässt sich nun direkt der Reibungsanteil am Gesamtwiderstand des Profils beeinflussen, ohne die Form, beziehungsweise die projizierte Fläche des Profils zu verändern. Findet nun während des Schleppens der Profile eine minimale Auslenkung des Jochs um das Lager statt, ist das als direkte Änderung der Reibungskräfte an der Profiloberfläche zu interpretieren.

Zur Aufnahme dieser Kraft wird ein einseitiger Anschlag über eine Kraftmessdose vom Typ HMB U9B in der Symmetrieachse des NACA-Profiles auf Höhe des Jochs realisiert. Während des Schleppversuchs nimmt dieser Sensor die Kraft, die zur Auslenkung des Jochs führt, fortwährend über ein National Instruments PXI 1050, gesteuert von einem LabView-Programm, auf. Anschließend ist die Auswertung der Zeitreihe mit NI Diadem 2012 zur Bestimmung einer zeitlich gemittelten Kraft vorgesehen.

Die Kraftwaage wird zunächst mit zwei gleichartigen Profilen bestückt, Referenzfahrten werden durchgeführt. Anschließend wird ein Standardflügelprofil gegen ein mit einer

Ein Weg zur Herstellung künstlicher, Luft haltender Oberflächen wurde zusammen mit dem Industriepartner Swissflock eingeschlagen. Mit der Herstellung von Schnittflock, der hinsichtlich Faserstärken, -längen und -dichten ein Spektrum vergleichbar zum Schwimmpfarn *Salvinia* abdeckt, ist eine vergleichsweise einfache Produktionsmöglichkeit gefunden. Die Parameter sind dabei so gewählt, dass sie in der gleichen Größenordnung wie bei den untersuchten *Salvinia*-Arten liegen. Der Flock ist durch chemische Nachbehandlung mit

verschiedenen Mitteln zur Herstellung einer nanostrukturierten Oberfläche vollständig hydrophob, jedoch ohne

künstlichen, Luft haltenden Oberfläche beschichtetes Profil ausgetauscht, die Messfahrt wird im Anschluss durchgeführt. Die Fehleranfälligkeit ist durch die Austauschbarkeit der Flügelprofile im fertig montierten Messaufbau drastisch reduziert, ein erneutes Einmessen der Konfiguration ist nicht notwendig.

Die NACA-Profile sind einteilig CNC-gefräst, anschließend ist die Oberfläche geschliffen und mit Kunstharzlack versehen. Die Profile sind somit wasserbeständig, von gleichmäßiger Oberflächenqualität und besitzen Abmessungen von 600 mm in der Länge, 54 mm in der Dicke und 400 mm in der Höhe (vgl. Abb. 4). Die Halterung der Profile am Joch wird über jeweils vier M6-Gewindestangen realisiert, die durch ihren geringen Querschnitt die Wasserdurchdringungsfläche im Schleppkanal minimieren. Die Profile sind während des Versuchs komplett getaucht und mindestens 10 cm unter der Wasseroberfläche des Schleppkanals. Einzig die Gewindestangen durchbrechen die Wasseroberfläche; somit ist gewährleistet, dass der Wellenwiderstand der Halterung klein gehalten wird.

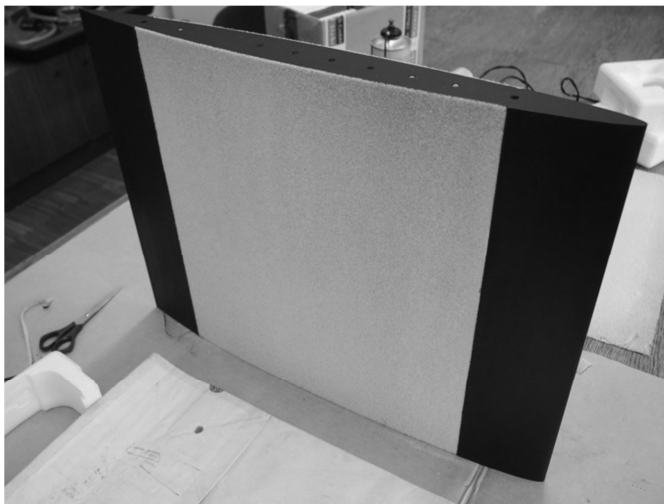


Abb. 4: Aufbringen der künstlichen, Luft haltenden Oberfläche auf das Profil

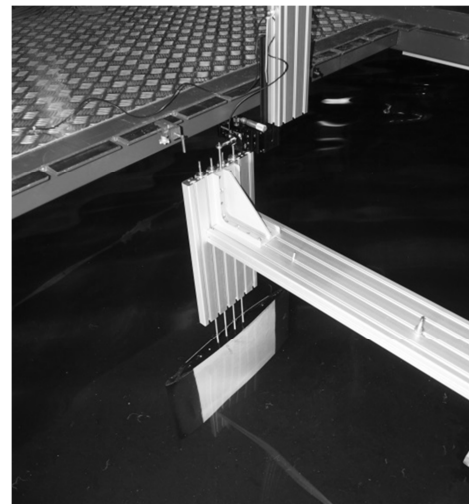


Abb. 5: getauchtes Profil in der Messeinrichtung

Die künstlichen, Luft haltenden Oberflächen werden in Form von nach den oben genannten Spezifikationen beflockten, selbstklebenden PVC-Folien auf die Profiloberflächen eingepasst und verklebt. Um während des Versuchs die Abmessungen und die projizierten Flächen der Profile konstant zu halten, sind in die Profile Taschen mit der Tiefe der Luft haltenden Oberfläche eingefräst. Die aufgeklebte, künstliche Oberfläche passt sich somit in die Oberflächenkontur des NACA-Profils nahtlos ein. Anschließend werden die Flockoberflächen chemisch behandelt, dass die hydrophobe, Luft haltende Wirkung entsteht.

Der Versuchsaufbau wird an einem im Jahr 2012 auf den neuesten Stand der Technik modernisierten Schleppwagen am Lehrstuhl Strömungsmechanik befestigt. Der Wagen verfügt über einen modernen und leistungsstarken Linearmotorantrieb, mit dem Beschleunigungen von über 10 m/s^2 und Geschwindigkeiten von bis zu 15 m/s erreicht werden können; die nutzbare Schlepprinnenlänge beträgt gut 40 m, sie ist 5 m breit und 3 m tief. Für die Versuche mit künstlichen, Luft haltenden Oberflächen werden jedoch nur maximale Geschwindigkeiten von 1 m/s und nur kleine Beschleunigungen von rund $0,1 \text{ m/s}^2$ mittels eines automatisierten Fahrprogramms gefahren.

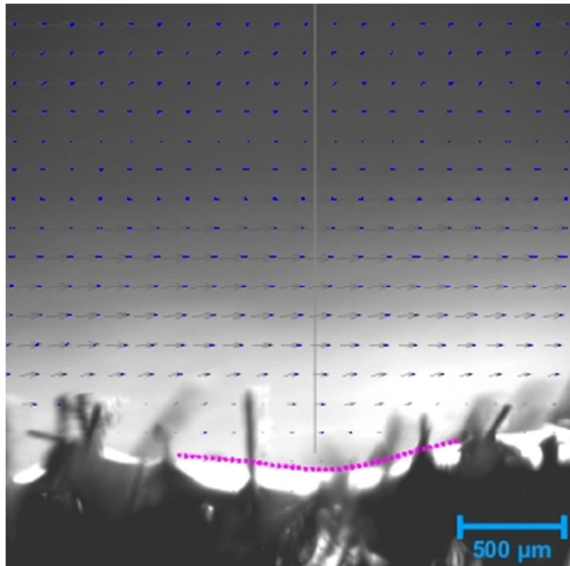


Abb. 6: Geschwindigkeitsmessungen mit μ PIV an künstlichen, Luft haltenden Flockoberflächen

Ergebnisse

Die Bestimmung der Reibungsreduktion bei Luft haltenden Oberflächen erfolgt bei diesem Versuchsaufbau über den direkten Vergleich eines konventionell lackierten und eines mit künstlicher, Luft haltender Oberfläche beschichteten Profils.

Bereits für die Auslegung des Messaufbaus wurde vorab der Gesamtwiderstand der Profile durch eine numerische Simulation bestimmt. Hierzu wird das NACA-Profil mit der Halterung durch die Gewindestangen in der Wasserströmung simuliert. Der Netzaufbau erfolgt unstrukturiert mit prismatischer Unterschicht und lokaler Knotenverdichtung in ICEM CFX 14.0. Die Berechnungen erfolgen als RANSE-Simulationen mit Gamma-Theta-Modell zur Grenzschichtberechnung in Ansys CFD 14.0.

Durch die Nutzung der numerischen Simulation lassen sich zudem die einzelnen Komponenten des Gesamtwiderstandes eines Profils bestimmen, was erst eine abschließende Berechnung der Reibungsreduktion erlaubt; die Ergebnisse des Schleppversuchs liefern lediglich Kraftdifferenzen, keine absoluten Werte.

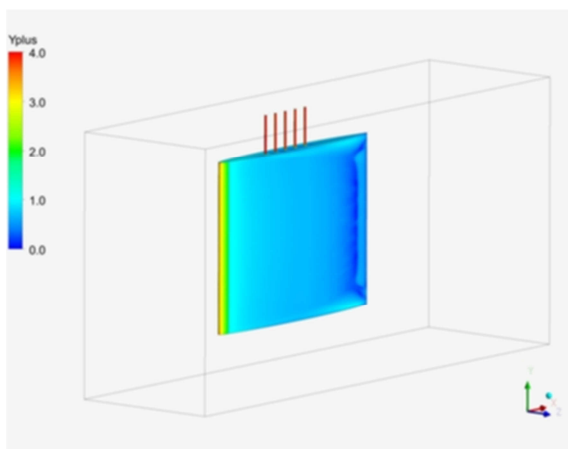


Abb. 7: Domain zur Berechnung der Widerstandswerte

Weitere Ansätze zur Auswertung liefern die Ergebnisse der im Vorlauf entstandenen μ PIV-Messungen, die sich sowohl mit den biologischen, als auch verschiedenen künstlichen Oberflächen befasst haben. Die Messmethode ist bereits mehrfach im Rahmen der GALA-tagung vorgestellt, so bei Brede 2008 und Melskotte 2010. Dabei kamen chemisch nachbehandelte Flockoberflächen, vergleichbar zum Schleppexperiment, zum Einsatz. Die μ PIV-Messungen ergaben, dass am Übergang der Luftschicht zum Wasser eine Wassergeschwindigkeit deutlich größer Null festgestellt werden konnte. Für den in Abb. 6 dargestellten Fall konnte an der markierten

Oberfläche ein Geschwindigkeit $u/U=0,13$ bestimmt werden.

Daneben lässt sich mit dem bei der μ PIV-Messung bestimmten Gradienten des Geschwindigkeitsprofils normal zur Luft-Wasser-Grenzschicht eine Reibungsreduktion von über 40 % im Vergleich zur ebenen Platte errechnen.

Die Versuche mit den geschleppten Profilen werden mit zwei verschiedenen Flockmischungen durchgeführt, die sich im Basismaterial des Flocks, nicht in Länge und Durchmesser der Fasern unterscheiden. Beide Flockoberflächen werden auf eigene NACA-Profilen aufgebracht und gleichermaßen chemisch behandelt.

Grundlegendes Problem bei künstlichen, Luft haltenden Oberflächen auf Flockbasis sind die Randbereiche. Hier konnten bisher die Ansätze aus der Natur, die eine stetige Abnahme der

Haarstrukturgrößen zum Blattrand hin zeigen, noch nicht umgesetzt werden. Es ist somit hier eine Schwachstelle an der Beschichtung vorhanden, über die potenziell Luft entweichen kann.

Die Messdatenerfassung wird parallel zum Starten des Wagens begonnen und endet nachdem der Wagen wieder zum Halt gekommen ist. Anfahren und Abbremsen des Wagens werden über konstante Beschleunigungs- beziehungsweise Verzögerungswerte vorgegeben. Dazwischen findet eine Fahrt mit konstanter Geschwindigkeit über einen Zeitraum von ca. 25 Sekunden bei einer Schleppgeschwindigkeit von 0,5 m/s und 17 Sekunden bei einer Schleppgeschwindigkeit von 1 m/s statt.

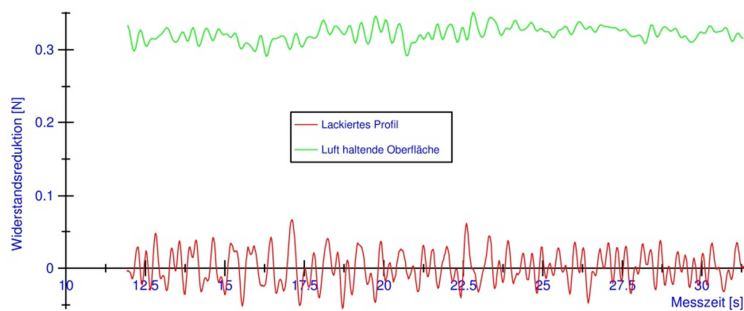


Abb. 8: Vergleich der Messungen mit lackierten Profilen (rot) und einem Luft haltenden Profil (grün) bei einer Schleppgeschwindigkeit von 0,5 m/s

Die Auswertung der Messungen erfolgt über National Instruments DIADEM 2012. Hier werden die Daten aufbereitet und anschließend statistisch ausgewertet. Die Ergebnisse der Messungen mit künstlichen, Luft haltenden Oberflächen können dann in Relation zur Kalibrierfahrt mit gleichartig beschichteten Profilen gesetzt werden. Als Differenz lässt sich der Einfluss der Luft haltenden Oberfläche auf die Reibung ablesen.

Da durch die oben beschriebenen Eigenschaften der künstlichen, Luft haltenden Oberflächen noch keine dauerhafte Haltung der Luftschicht erfolgt, können zunächst nur drei Messungen bei einer Schleppgeschwindigkeit von 0,5 m/s erfolgreich durchgeführt werden. Bei höheren Geschwindigkeiten kommt es zu einem schnellen Abschwimmen der Luft, die Oberfläche wird von Wasser benetzt.

Ausgehend von den Vorbetrachtungen hinsichtlich des Widerstandes der lackierten Profile lässt sich nun die reibungsreduzierende Wirkung der Luft haltenden Oberfläche berechnen. Wie Abb. 8 zu entnehmen ist, findet an einem mit einer künstlichen, Luft haltenden Oberfläche beschichtetem Profil eine Reibungsreduktion von rund 0,3 N statt. Bezogen auf die Berechnungen am Profil lässt sich somit festhalten, dass die Gesamtreibung am Profil um rund 31% reduziert werden kann. Verglichen mit den Abschätzungen aus den μ PIV-Messungen lässt sich abschließend festhalten, dass die durch Messungen im Schleppkanal gewonnenen Reduktionsraten geringer sind, als die aus den Geschwindigkeitsmessungen abgeleiteten, jedoch sich die Größenordnung bestätigen lässt.

Danksagung

Wir danken dem Bundesministerium für Bildung und Forschung für die finanzielle Förderung des Projektes im Rahmen des BIONA Forschungsprogramms. Spezieller Dank gilt auch dem Lehrstuhl Meerestechnik der Universität Rostock für personelle Hilfestellung und die Leihgabe von Messtechnik.

Literatur

- Barthlott, W. & Neinhuis, C., 1997: "Purity of the sacred lotus, or escape from contamination in biological surfaces", *Planta* 202, 1-8
- Barthlott, W., Schimmel, T., Wiersch, S., Koch, K., Brede, M., Barczewski, M., Walheim, S., Weis, A., Kaltenmaier, A., Leder, A., Bohn, H.F., 2010: "The Salvinia Paradox: Superhydrophobic Surfaces with Hydrophilic Pins for Air Retention Under Water", *Adv. Mater.* 2010, 22, 1-4

- Brede, M.; Birkner, T.; Leder, A.; Barthlott, W., 2008: „Strömungseigenschaften superhydrophober Luft haltender Oberflächen – Untersuchungen mittels μ PIV-Technik“, in: A. Leder, B. Ruck, D. Dopheide (Hrsg.), *Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik*, 16. Fachtagung der GALA e.V. 2008, Karlsruhe: Deutsche Gesellschaft für Laser-Anemometrie, S. 30.1-30.6
- Koch, K., Bhushan, B. & Barthlott, W., 2010: *Functional plant surfaces, smart materials. Handbook of Nanotechnology*, 3rd Ed. Springer, Heidelberg, Germany
- Melskotte, J.-E.; Brede, M.; Leder, A. & Barthlott, W., 2010: „Reibungsreduktion durch künstliche Luft haltende Oberflächen nach biologischem Vorbild“, in: Egbers, C.; Ruck, B.; Leder, A.; Dopheide, D. (Eds.): *Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik*, 18. Fachtagung, 7. - 9. September 2010, Cottbus, Karlsruhe, Dt. Ges. für Laser-Anemometrie pp. 25.1-25.6, 2010
- Melskotte, J.-E.; Brede, M.; Mayser, M.; Leder, A. & Barthlott, W., 2012: „Geschwindigkeitsmessungen an Luft-haltenden Deckflügeln des *Notonecta glauca*“, in: *tm - Technisches Messen*: Vol. 79, No. 6, pp. 297-303, 2012
- Yan, Y. Y., Gao, N. & W. Barthlott (2011): Mimicking natural superhydrophobic surfaces and grasping the wetting process: A review on recent progress in preparing superhydrophobic surfaces. *Advances in Colloid and Interface Science*, 26 p.