

Stabilität und Reibungseigenschaften biomimetischer, Luft haltenden Beschichtungen für die Serienfertigung

stability and friction of biomimetic, air retaining coatings for industrial applications

M. Brede¹, R. Zielke¹, A. Wolter¹, B. Böhnlein², M. Fischer³, I. Medebach³, W. Barthlott², T. Schimmel³, A. Leder¹

¹ Universität Rostock, Lehrstuhl Strömungsmechanik, Albert-Einstein-Str. 2, 18059 Rostock

² Universität Bonn, Nees-Institut für Biodiversität der Pflanzen, Venusbergweg 22, 53115 Bonn

³ Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Nanotechnologie, Hermann-von-Helmholtz-Platz 1, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen

Reibungsreduktion, Luft-Wasser, funktionale Oberflächen, Bionik, Salvinia Effekt
drag reduction, air-water, functional interfaces, biomimetics

Abstract

Die Fortbewegung von Schiffen durch das Wasser erfordert die Überwindung der Reibung zwischen Wasser und Schiffsrumpf. Durch die Herstellung von mikrostrukturierten Oberflächen ist die Lufthaltung im Labormaßstab erfolgreich realisiert worden. Zur Anwendung am Schiffsrumpf ist es jedoch notwendig, große Flächen zu beschichten und gleichzeitig die Eigenschaft der Reibungsreduktion zu erhalten. Die bisher untersuchten Materialien sind nur schwer in großer Fläche herzustellen. Der vorliegende Beitrag demonstriert an verschiedenen Prototypen mit neuen Materialien die Lufthaltung für Schiffsrumpfflächen. Die Prototypenflächen werden sowohl im Mikrokanal als auch in Schleppversuchen hinsichtlich Haltbarkeit unter Scherbelastung sowie Reibungsreduktion untersucht. Es zeigt sich, dass die Reibungsreduktion Hilfe von replikationstechnikbasierten Materialien darstellbar ist. Schleppversuche zeigen die Haltbarkeit der Luftschicht in der makroskopischen, anwendungsnahen Skala.

Einleitung

Bei einer Bewegung die Reibung zu reduzieren, bedeutet Energie einzusparen. Dies ist für viele Organismen in der Natur von Bedeutung, da sie auf diese Weise weniger Energie für die Bewegung verbrauchen. Auch Schiffe, die durch das Wasser fahren, müssen zur Bewegung die Reibung zwischen Wasser und Schiffsrumpf überwinden (Übersicht und Literatur in Bhushan 2017). Die Reduktion dieser Reibung, beispielsweise durch eine Luftschicht am Schiffsrumpf, führt zu einer deutlichen Kostenersparnis.

Sowohl aus der Pflanzen- als auch der Tierwelt sind Beispiele bekannt, in denen Reibung unter Wasser vermindert wird, oder Effekte der Lufthaltung ausgenutzt werden (Übersicht in Barthlott et al. 2017). Die Schwimmpflanze *Salvinia* bilden beispielsweise eine permanent Luft haltende Schicht an der Oberseite ihrer Blätter aus. Die Oberfläche der Blätter ist dabei dicht mit Mikrostrukturen besetzt, die je nach *Salvinia*-Art eine Größe zwischen wenigen Mikrome-

tern und einigen Millimetern besitzen. Diese feinen Härchen sind mit winzigen hydrophoben Wachskristallen bedeckt und haben eine hydrophile Strukturspitze („Ankerzellen“) Aufgrund dieser Eigenschaften können diese Wasserfarne Luft unter Wasser halten („Salvinia-Effekt“, Barthlott et al. 2010, Mayser et al. 2014). Der Nutzen dieser Eigenschaft besteht für die Pflanze darin, die Atmung und den Gasaustausch unter Wasser aufrechtzuerhalten. In der Tierwelt sind die Rückenschwimmer *Notonecta* dafür bekannt, eine Luftschicht unter Wasser halten zu können. Diese Luftschicht bildet sich dabei an verschiedenen Körperregionen, insbesondere den Deckflügeln dieses Lebewesens aus, wo die Strukturen der Härchen deutlich kleiner und völlig anders angeordnet sind als die von *Salvinia* (Ditsche-Kuru et al. 2011). Es ist sowohl für die Pflanzen, als auch für die Tiere wichtig, dass diese Luftschichten auch unter Strömungsbelastung erhalten bleiben, damit der Reibungsreduktionseffekt nicht verloren geht. *Notonecta* erzeugt Luftschichten, die Strömungsbelastungen von bis zu über 5 m/s aushalten (Melskotte et al. 2013).

In der vorliegenden Arbeit werden künstliche, strukturierte und funktionalisierte Oberflächen als Mikrostruktur und als fertigungsnaher Prototyp hinsichtlich ihrer Reibungseigenschaften und ihrer Strömungsstabilität analysiert. Zunächst wird das Reibungsexperiment dargestellt. Danach wird auf den Schleppversuch eingegangen und es werden im letzten Teil kurz die Ergebnisse diskutiert.

Reibungsreduktion

Die Messungen der Reibungsreduktion wurden mit Hilfe der Druckverluste in einem Strömungskanal mit rechteckigem Querschnitt vorgenommen. Sie erlauben eine integrale Aussage zur erzielten Reibungsreduktion im Vergleich zur ebenen Wand.

Dafür wurde für einen bereits vorhandenen Mikrokanal ein neuer Einsatz gefertigt (Abbildung 2). Dieser wurde auf einer Länge von 200 mm und einer Querschnittsfläche von 15 mm x 30 mm komplett mit funktionalisierten Mikrosäulen aus Epoxidharz bzw. alternativ mit ebenen PMMA-Einsätzen ausgekleidet (Abbildung 3). Unmittelbar vor und hinter dieser Strecke sind Druckmessbohrungen angebracht. Durch das Messen der Differenz des Druckes vor und unter hinter der ausgekleideten Strecke, lässt sich der Druckverlust im Kanal genau bestimmen. Die Bestimmung des Druckverlust wurde sowohl mit einem Wasser/Öl-U-Rohr-Manometer mechanisch, als auch mit Hilfe eines Druckkonverters und einem MKS Baratron elektrisch bestimmt werden. Im Vergleich der Proben lässt sich die relative Reibungsreduktion gegenüber einer glatten Wand ermitteln.

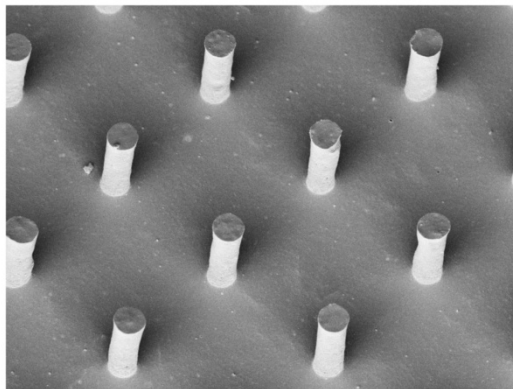


Abbildung 1: REM-Aufnahme der Mikrosäulenprobe

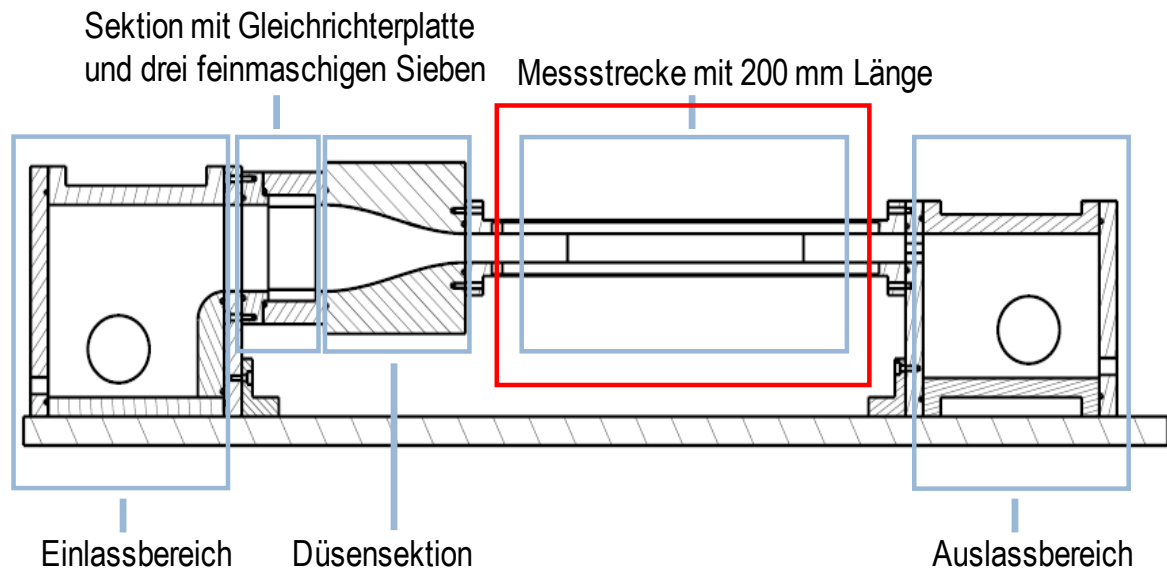


Abbildung 2: Mikrokanal mit wechselbarer Messstrecke für Druckdifferenz und Mikro-PIV Messungen

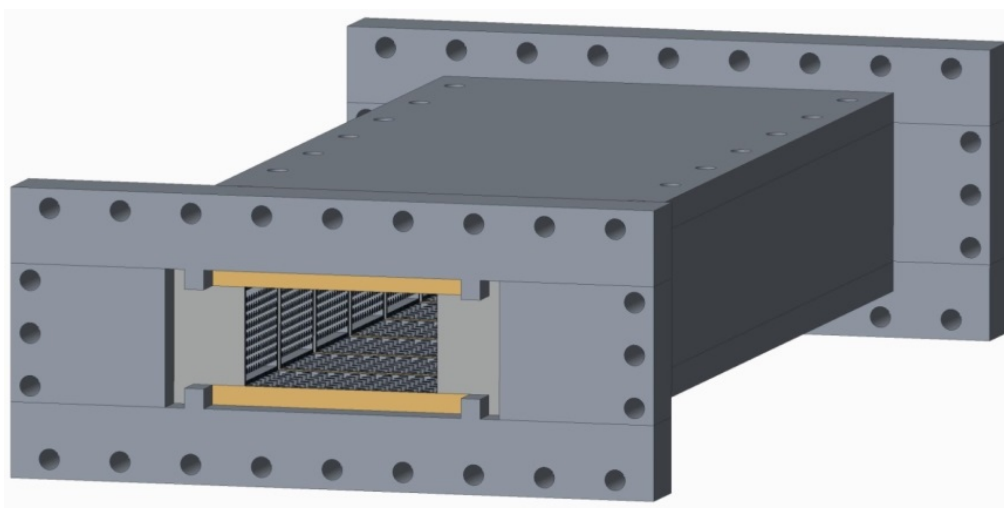


Abbildung 3: Vollständig mit superhydrophobem, Luft haltenden Material beschichtete Druckgradientenmessstrecke.

Für die in Bonn seit 2006 verwendeten Wafer-Repliken mit Mikrosäulen konnte eine Reibungsreduktion von ca. 17% nachgewiesen werden (Abbildung 4). Dabei ist diese Zahl schon nahezu ein Worst-Case Szenario. Durch die Dicke der Luftschicht kann es im Kanal zu einer Versperrung kommen, welche zu einem erhöhten Druckverlust führen würde. Außerdem wurde zur Auskleidung eine Vielzahl kleiner Proben genutzt, deren Kanten nicht überall geglättet werden konnten, die allerdings weitgehend von der Luftschicht überspannt wurden.. Bei Geschwindigkeiten über 2 m/s löste die Luftschicht im Kanal ab. Nach Ablösen der Luftschicht ging die Reibungsreduktion in eine Reibungserhöhung über.

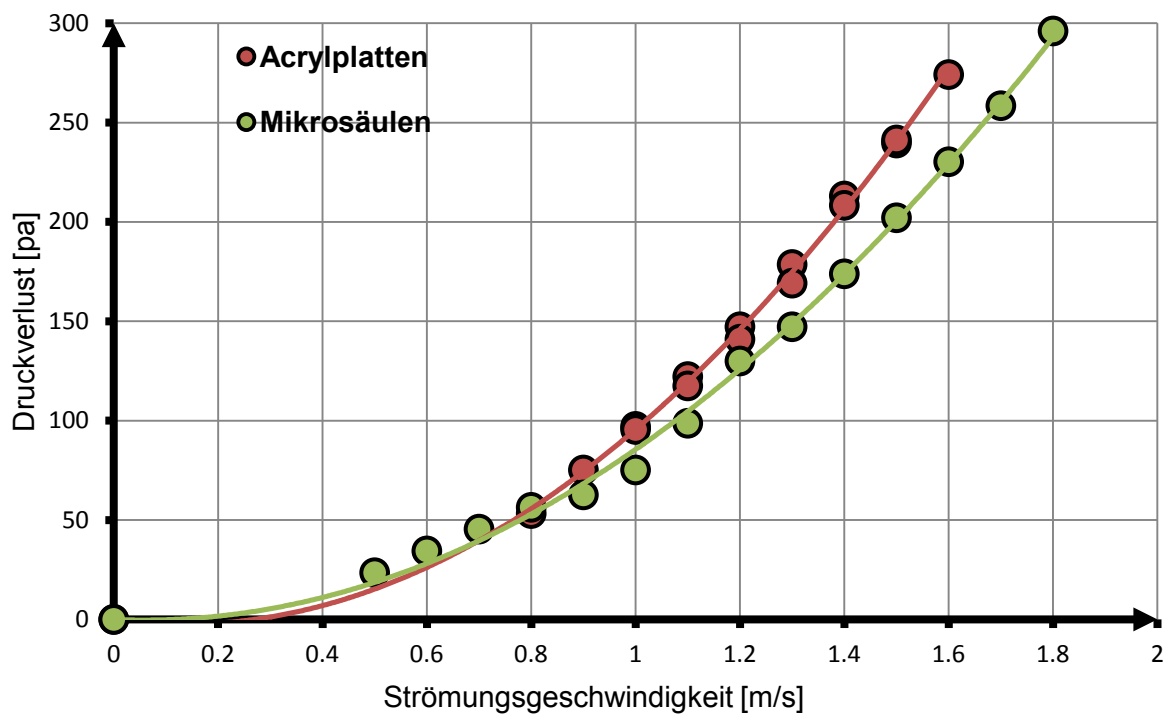


Abbildung 4: Druckverlust über der Mikrokanalstrecke für Mikrosäulenbeschichtung und für Acrylplatten (Referenz)

Lufthaltung im Modellversuch

Aus den Daten der Laborversuche mit kleinen Proben (Baumgarten 2014) wurde nach Parametervariation von Strukturart (Säulen, Haken, Dichte, Anordnung) von den Partnern am KIT eine Prototypenstruktur entwickelt die sich insbesondere auch in Abformtechnik auf großen Skalen im Quadratmeterbereich herstellen lässt. In Abbildung 5 ist ein Versuch mit verschiedenen Kammergrößen und Hakenstrukturen zu erkennen.

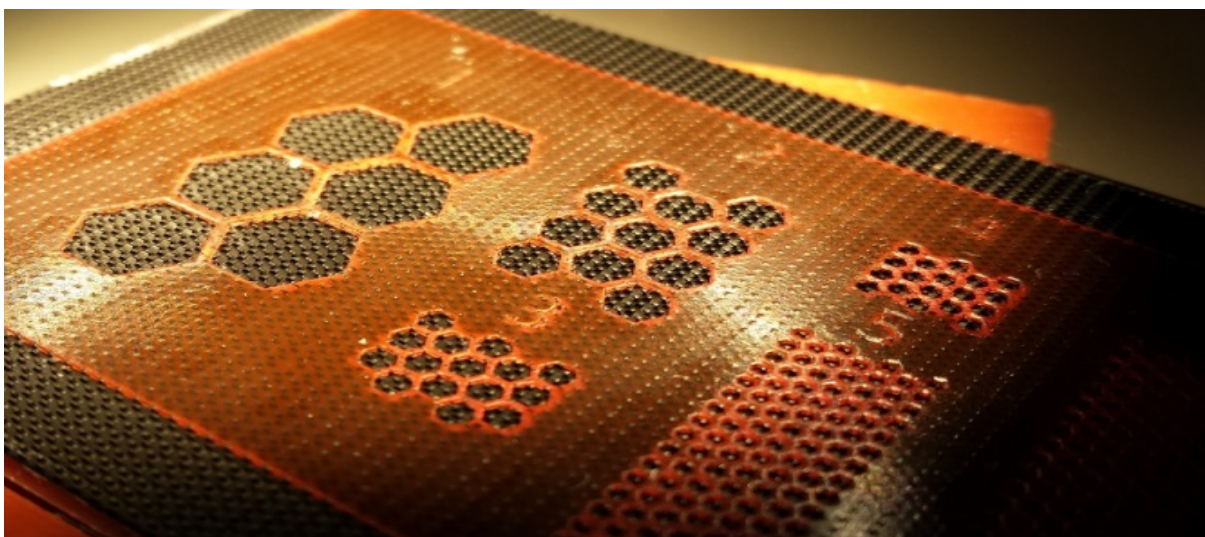


Abbildung 5: Mikrostrukturen-Kacheln - ARES-Prototypenstruktur

Für einen praxisnahen Test einer solchen großflächigen Schiffsbeschichtung wurde ein Versuchsaufbau gewählt, der in Anlehnung an Melskotte (2013) am Hochleistungsschleppsystem der Universität Rostock realisiert wurde. Hier wurden zwei formidentische Profile an eine Kraftwaage montiert.

Die Schleppversuche dienten vorrangig zur Feststellung der Eignung von großen strukturierten Modulflächen. Es war der Nachweis zu erbringen, dass die Lufthaltung auch bei den in Silikonusstechnik hergestellten Modulen von 11 x 21 cm Größe gegeben ist. Das zu beschichtende Profil wurde deshalb flächig mit Modulen beklebt. Die Moduldicke wurde in Form einer Einfräsung in den Tragflügelkörper berücksichtigt, so dass die Profilform unverändert bleiben sollte. Da die Versuche an der symmetrisch aufgebauten Balkenwaage durchgeführt, wurden auch Kraftmessdaten aufgenommen. Aus dieser Kraftdifferenz zwischen beschichtetem und unbeschichtetem Modul lassen sich unter Idealbedingungen direkt Rückschlüsse auf die Reibungs-Veränderung treffen. Wesentlich zur Beurteilung der Lufthaltungsfähigkeiten ist die Beobachtung der Luftschicht in Unterwasseraufnahmen. Hier wurden die Beschichtungen diffus beleuchtet, um die Luftschicht durch die Totalreflektion beobachten zu können.

Bei zuvor durchgeführten Eintauchversuchen in reinem Wasser konnte bei dem silikonbasierten Material kein signifikanter Einfluss der Zahl der Eintauchvorgänge oder einer simulierten Wellenbewegung festgestellt werden. Damit kann die Beschichtung als stabil gegenüber Eintauchen und Wellen angesehen werden. Bei den großskaligen Versuchen des Schleppens der beschichteten Profile konnten diese Ergebnisse reproduziert werden. Obwohl die Profile wiederholt zwischen den Messdurchläufen aus und wieder eingetaucht wurden blieb die Luftschicht vollständig erhalten. Nach Trocknen konnte bei den ARES-Modulen aus Silikon wieder die volle Lufthaltefähigkeit wiederhergestellt werden, nachdem diese wieder vollkommen benetzt waren (Abbildung 6).

An der Waage wurden zwei Profile wiederholt parallel durch das Wasserbecken gezogen (Abbildung 7). Die Aufnahmen zeigten die Robustheit der Beschichtung. Trotz Störung durch Anströmung, Bugwelle und wiederholtem Eintauchen gelang es der Beschichtung durchgängig die Luftschicht zu halten. Die Kraftmessungen blieben ohne eindeutiges Ergebnis, da die Beschichtung an der Vorderkante Transition induzierte, die die Reibungersparnis zunichtemachte.

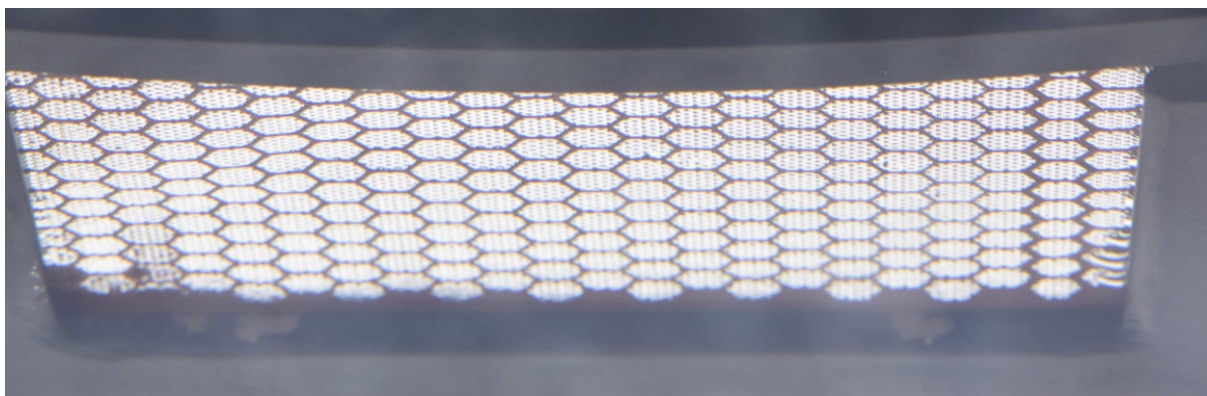


Abbildung 6: Lufthaltung des Silikonprototypenmaterials (ARES-Modul)

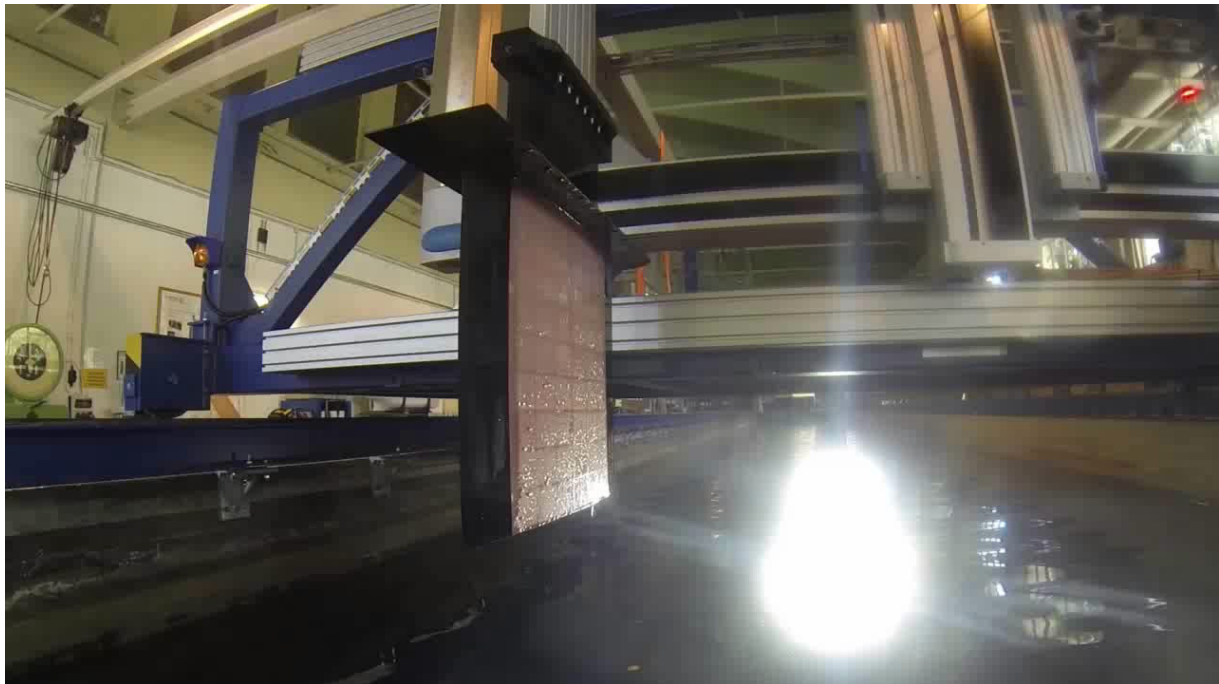


Abbildung 7: Schleppversuchs des Silikonprototypenmaterials

Diskussion

Die hier dargestellten Ergebnisse liefern erstmals quantitative Daten zur Reibungsreduktion Luft haltender Materialien aus Mikrosäulen. Damit hat sich bestätigt, dass die Mikrosäulenbasierten Materialien ein sehr hohes Weiterentwicklungspotential aufweisen. Für zukünftige Anordnungen wird die Kombination aus robusteren Bogen- oder Hakenstrukturen vorgeschlagen, die zusätzlich mit hydrophilen Spitzen versehen sind und somit den „Salvinia-Effekt“ (Barthlott et al. 2010, Mayser et al. 2014) ausnutzen, um die Stabilität der Luftschicht nochmals zu erhöhen. Im Ergebnis der Untersuchungen konnte auch festgestellt werden, dass mit dem Druckdifferenzkanal eine einfache Möglichkeit besteht verschiedene Prototypenmaterialien quantitativ auf ihre Reibungsreduktion hin zu untersuchen.

Im Schleppversuch zeigte sich, dass die silikonbasierte Prototypenbeschichtung (ARES-Modul) eine hohe Stabilität aufweist und eine durchgehende Luftschicht bei einer Anströmgeschwindigkeit von 2 m/s halten konnte, was bisher mit keiner den Autoren bekannten hydrophoben Probenbeschichtung gelungen ist. Die Anströmgeschwindigkeit von 2 m/s übertrifft im Mittel bereits deutlich die Geschwindigkeit der viskosen Unterschicht am Schiffsrumpf eines Frachtschiffes, das sich mit 8 m/s fortbewegt. Dementsprechend ließen sich auch schwere Frachtschiffe bei ihren üblichen Fortbewegungsgeschwindigkeiten mittels hydrophoben Silikonmodulen derart beschichten, dass sie eine permanent Luft haltende Schicht aufrechterhalten, was in Konsequenz die Reibung vermindert und daher auch die Transportkosten senkt. In welchem quantitativen Zusammenhang die Bedingungen zur Stabilität der Luftschicht mit der erzielten Reibungsreduktion steht, muss in zukünftigen Studien weiter überprüft werden. Das Ziel ist es, in der praxisnahen Implementierung von Luft haltenden Schichten einen idealen Kompromiss zwischen Reibungsreduktion und hoher Stabilität bei instationärer Anströmung bei gleichzeitiger Eignung des Materials zur großflächigen Anwendung zu finden.

Danksagung

Die Autoren danken dem Bundesministerium für Bildung und Forschung für die Förderung des Verbundvorhabens „Permanent Luft haltende Schiffsbeschichtungen nach biologischem Vorbild zur Reibungsreduktion: vom Konzept zur Technologie (ARES)“ im Rahmen des Programms „Validierung des Innovationspotenzials wissenschaftlicher Forschung – VIP“

Literatur

Barthlott, W., Schimmel, Th., Wiersch, S., Koch, K., Brede, M., Barczewski, M., Walheim, S., Weis, A., Kaltenmaier, A., Leder, A., Bohn, H. F.: The Salvinia Paradox: Superhydrophobic Surfaces with Hydrophilic Pins for Air Retention Under Water, *Adv. Mater.* 2010, 22, 1–4

Barthlott, W., Mail, M. & Neinhuis, C.: Superhydrophobic hierarchically structured surfaces in biology: evolution, structural principles and biomimetic applications. *Phil. Trans., Roy. Soc. A, London* 2016, doi:10.1098/rsta.2016.0191

Barthlott, W., Mail, M., Bhushan, B. & K. Koch , *Plant Surfaces: Structures and Functions for Biomimetic Innovations.* – *Nano-Micro Letters*, Springer, 2017. doi:10.1007/s40820-016-0125-1

Baumgarten, W., Böhnlein, B., Wolter, A., Brede, M., Barthlott, W., Leder, A.: Einfluss der Strömungsgeschwindigkeit auf die Stabilität von Luft-Wasser Grenzflächen an biomimetischen, Luft haltenden Beschichtungen. In: Ruck, B.; Gromke, C.; Klausmann, K.; Leder, A.; Dopheide, D. (Eds.): *Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik. 22. Fachtagung 9. - 11. September 2014.* GALA, Karlsruhe, p. 36.1-36.5–36, ISBN 9783981676402

Ditsche-Kuru, P., Schneider, E. S., Melskotte, J.-E., Brede, M., Leder, A., Barthlott, W.: Superhydrophobic surfaces of the water bug *Notonecta glauca*, a model for friction reduction and air retention, *Beilstein J. Nanotechnol.* 2011, 2, 137-144, doi:10.3762/bjnano.2.17

Bhushan, B. (Ed); *Springer Handbook of Nanotechnology, 4th Edition*, Springer Publishers, 2017, ISBN 978-3-662-54355-9

Gandyra, D., Walheim, S., Gorb, S. Barthlott, W., Schimmel, Th.: The capillary adhesion technique: a versatile method for determining the liquid adhesion force and sample stiffness, *Beilstein Journal of Nanotechnology* 2015, 6, 11-18, doi:10.3762/bjnano.6.2

Mayser, M. J., Bohn, H. F., Reker, M., Barthlott, W.: Measuring air layer volumes retained by submerged floating-ferns *Salvinia* and biomimetic superhydrophobic surfaces, *Beilstein J. Nanotechnol.*, 2014, 5, 812-821, doi:10.3762/bjnano.5.93

Melskotte, J.-E., Brede, M., Wolter, A., Barthlott, W., Leder, A.: Schlepversuche an künstlichen, Luft haltenden Oberflächen zur Reibungsreduktion am Schiff. In: Kähler, C. J.; Hain, R.; Cierpka, C.; Ruck, B.; Leder, A.; Dopheide, D. (Eds.): *Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik. 21. Fachtagung, 3. - 5. September 2013, München.* Dt. Ges. für Laser-Anemometrie GALA e. V, Karlsruhe, p. 53-1 - 53-7–53, ISBN 978-3-9805613-9-6