

## BIOMIMETISCHE SUPERHYDROPHOBE LUFT HALTENDE OBERFLÄCHEN ZUR TECHNISCHEN ANWENDUNG

### BIOMIMETIC SUPERHYDROPHOBIC AIR RETAINING SURFACES FOR ENGINEERING APPLICATIONS

**Martin Brede, Jan Erik Melskotte, Thomas Birkner, Alfred Leder und Wilhelm Barthlott<sup>1</sup>**

Universität Rostock, Lehrstuhl für Strömungsmechanik, Albert-Einstein-Str. 2, 18051 Rostock

<sup>1</sup>Universität Bonn, Nees-Institut für Biodiversität der Pflanzen, Meckenheimer Allee 170, 53115 Bonn

Mikrofluidik, Bionik, funktionale Oberflächen  
microfluidics, biomimetics, functional surfaces

#### Zusammenfassung

Superhydrophobe Oberflächen verhindern in der Natur bei verschiedenen Tier- und Pflanzenarten die Benetzung der eigentlichen Festkörperoberflächen selbst dann, wenn sie untergetaucht werden. Erste Studien (Solga et al. 2007) zeigen die Übertragbarkeit der Eigenschaften von biologischen Strukturen auf modellierte synthetische superhydrophobe Oberflächen auf die technische Anwendung. Die strömungsmechanischen Eigenschaften dieser Oberflächen wurden mit dem in den vergangenen Jahren an der Universität entwickelten Stereo- $\mu$ PIV-System (Brede et al. 2006, 2007) ermittelt. Erste Ergebnisse für das synthetische Textilmaterial zeigen eine gute Übereinstimmung des Strömungsverhaltens an *Salvinien* und am Textil in der Nähe der Grenzfläche zwischen der Wasserphase und der gehaltenen Luftschicht in Wandnähe.

#### Einleitung

Superhydrophobe Oberflächen sind bei biologischen Systemen weit verbreitet. Ein bekanntes Beispiel ist das Blatt der Lotuspflanze (*Nelumbo nucifera*, Barthlott & Neinhuis 1997). An diesen Blättern zeigen aufliegende Wassertropfen einen großen Benetzungswinkel, der durch die superhydrophoben Eigenschaften der Blattoberfläche hervorgerufen wird. Die Kontaktfläche zwischen Wasser und Blatt wird dadurch außerordentlich klein. Die Pflanze erreicht so, dass Wassertropfen ohne Benetzung abperlen. Weniger bekannt ist eine Ergänzung der superhydrophoben Eigenschaften mit der Fähigkeit, unter Wasser Luftschichten an der Oberfläche zu halten. Sie wird dadurch erreicht, dass die Oberfläche mit vertikalen Strukturen überzogen ist, die in einem Bereich von einigen hundert Mikrometern bis zu einigen Millimetern liegen. Diese Anordnung ist in Abbildung 1 schematisch dargestellt.

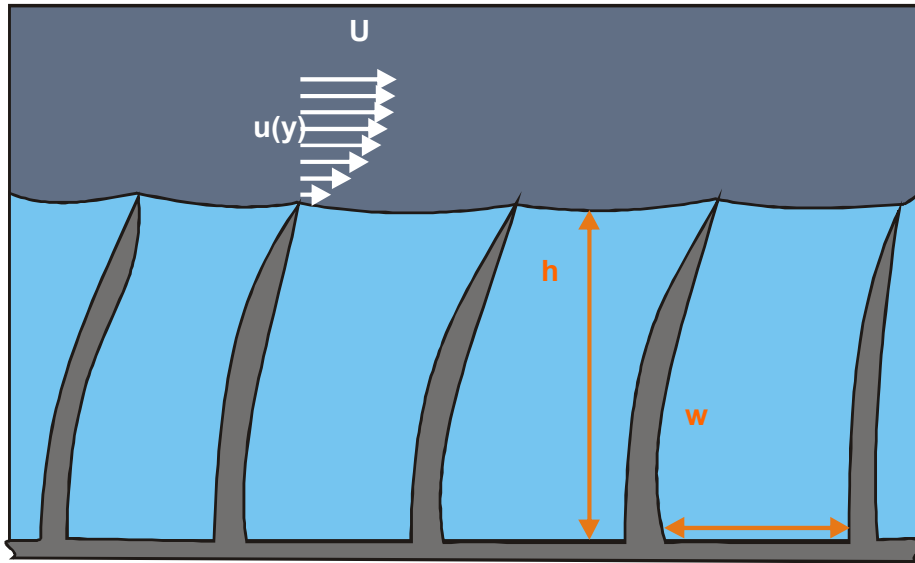


Abb. 1: Oberflächenstruktur einer superhydrophoben Luft haltenden Oberfläche

Die superhydrophoben Eigenschaften des Materials verhindern dabei die Benetzung, die Oberflächenspannung des Wassers verhindert ein Eindringen des Fluids in die Zwischenräume der Vertikalstrukturen.

Ein Beispiel für superhydrophobe, Luft haltende Oberflächen sind die Blätter der Schwimmfarns *Salvinia*. An den Blättern von *Salvinia auriculata* wird, wie bereits in der schematischen Darstellung in Abbildung 1 gezeigt, ein Luftfilm gehalten, der selbst dann bestehen bleibt, wenn das Blatt vollständig eingetaucht wird. An der Wasser-Blatt Grenzfläche gelten nun zwei Randbedingungen. An den Spitzen muss die Haftbedingung mit tangentialer Strömungsgeschwindigkeit  $u=0$  gelten. An den Wasser-Luft Grenzflächen dazwischen dagegen kann ein Gleiten erfolgen, die tatsächlich auftretenden Schubspannungen an der Grenzfläche waren bislang noch unbekannt.

Die Modifizierung der Haftbedingungen an einer benetzten Oberfläche ist ein etabliertes Forschungsthema im Schiffbau. Mehrere Versuche wurden unternommen, beispielsweise durch die Erzeugung von Blasen am Schiffsrumpf die Wandhaftung zu verringern und somit die Haftreibung zu reduzieren (Merkle & Deutsch 1990, Kodama, et al. 2005). Ein wesentlicher Teil der Energieeinsparung wird jedoch durch die aufwändige und ineffiziente Blasenenerzeugung aufgezehrt. Mit einer wandgebundenen Luftschicht in einer superhydrophoben lufthaltenden bionischen Struktur nach Vorbild der *Salvinia* gibt es nun einen neuen Weg zu diesem Ziel. Zudem stehen nun verschiedene synthetische Materialien mit superhydrophoben, Luft haltenden Eigenschaften zur Verfügung.

## Mikro-PIV-Technik

Erste Versuche an superhydrophoben Luft haltenden Oberflächen wurden mit Hilfe des bereits zuvor vorgestellten Mikro-PIV-Systems durchgeführt (Brede et al. 2007). Dieses System wurde hier mit einer Dantec Hi-Sense PIV-Kamera mit 1280 x 1024 Pixel Auflösung verwendet. Diese sitzt auf einem Zeiss Stemi 11 Mikroskop. Als Objektiv wurde ein Leica plano 2x mit einem Objektstand von 15 mm eingesetzt. Die Beleuchtung der Polyamid Streupartikel erfolgt mit einer gepulsten Lichtquelle im Durchlichtverfahren. Die CCD-Kamera erzeugt ein Doppelbild des Streuteilchenbildes. Das Doppelbild wird kreuzkorreliert gemäß der konventionellen PIV-Technik. Mit diesem Aufbau können Geschwindigkeitsfelder bis zu einer minimalen Größe von 400  $\mu\text{m}$  x 500  $\mu\text{m}$  mit einer Abtastfleckengröße bis zu minimal 12  $\mu\text{m}$  x 12  $\mu\text{m}$  verarbeitet werden. Hier wurde eine Bildfeldgröße von 2,1 mm x 2,7 mm verwendet. Der Versuchskanal für biologische Strömungen weist einen Kanalquerschnitt von 15 mm x 30 mm und wurde in seiner Baugröße so kompakt ausgelegt, dass er von einer Mikro-Dreiaxentraverse bewegt werden kann, die eine minimale Schrittweite von 0,2  $\mu\text{m}$  erlauben. Die zu untersuchenden Textilausschnitte von ca. 5 mm x 5 mm wurden wie zuvor die Ausschnitte der Salvinablätter (Brede 2008) adhäsiv auf einem Kunststoffträger befestigt und im Versuchskanal tangential angeströmt. Das Bildfeld liegt dabei senkrecht zur Probenoberfläche parallel zur Anströmung.

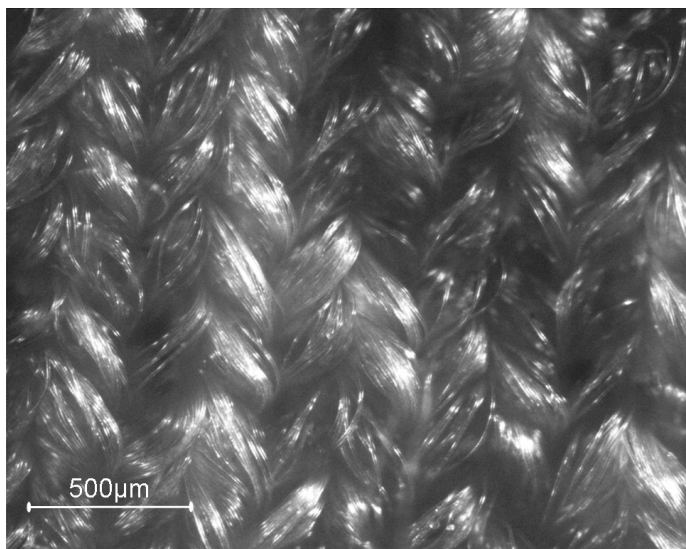


Abbildung 2 : Mikroskopaufnahme der textilen Gewebestruktur

## Oberflächenmaterial

Neben drei Salvinia-Arten (siehe Brede et al. 2008) wurde nun ein hydrophobiertes Textil untersucht. Dieses Textil ist eine Entwicklung des Bonner Nees Instituts und des Instituts für Textil- und Verfahrenstechnik Denkendorf. Das zum Patent angemeldete Material, dargestellt in Abbildung 2, besteht aus hydrophobierten Fasern, die zu einem Gewebe verarbeitet sind.

Wie auch die Schwimmblätter der unterschiedlichen Salvinia-Arten, stellt das Textil eine superhydrophobe Oberfläche dar. Durch die Gewebestruktur werden zwischen den wasserabweisenden Fasern Mikro- und Nanokavitäten gebildet, in denen die Luft gebunden werden kann. Untersuchungen hinsichtlich des Lufthaltevermögens ergaben, dass dieses Material in der Lage, ist Luft bis zu 4 Tage zu binden.

## Ergebnisse

Erste Messungen wurden an *Salvinia auriculata*, *Salvinia oblongifolia* und *Salvinia cucullata* Blättern durchgeführt, die mit Strömungsgeschwindigkeiten zwischen 0,2 und 0,8 m/s tangential angeströmt wurden. Zwei Aspekte stehen sowohl bei biologischen als auch bei synthetischen Materialien im Vordergrund der laufenden Untersuchung. Dies ist zum einen die Haltbarkeit der Luftschicht unter verschiedenen Versuchsbedingungen. Zum anderen müssen die Eigenschaften der biologisch gegebenen Oberflächen zur Verminderung von Reibungsverlusten modelliert und in optimaler Weise auf technisch gestaltete Oberflächen übertragen werden.

In den Messungen an *Salvinien* konnten zwei Phänomene unterschieden werden, die das Geschwindigkeitsprofil in Wandnähe dominieren. Es kam einerseits zu einer Ablösung mit anschließender Rezirkulation hinter den in die Wasserphase hineinragenden *Salvinia*-Haarspitzen. Die beobachtete Rezirkulation reduziert den Geschwindigkeitsgradienten in der Strömung im wandnahen Bereich und verringert so die Schubspannungskräfte am Wasser-Luft Interface. Zum anderen fanden sich weite Bereiche mit einer anliegenden Luftschicht. Wird das zeitgemittelte Geschwindigkeitsprofil an dieser Stelle ausgewertet, zeigen sich bei allen *Salvinien* etwa Geschwindigkeitsbeträge von  $u = 0,2$  m/s an der Wasser-Luft-Grenzfläche. Das deutet an, dass bedingt durch ein Gleiten der Wasserschicht an der Wasser-Luft Grenzfläche, der Geschwindigkeitsgradient und damit die Schubspannungen an der Grenzfläche verringert sind im Vergleich zum Fall eines wandhaftenden Fluids.

Am Textil zeigt sich eine vergleichbare Lufthaltung, die im Wesentlichen von einer Vielzahl einzelner Fasern getragen wird, die aus den Faserbündeln herausragen. Das Luft haltende Textil ist zusammen mit einem mit Mikro-PIV erfassten gemittelten Geschwindigkeitsprofil in Abbildung 3 dargestellt.

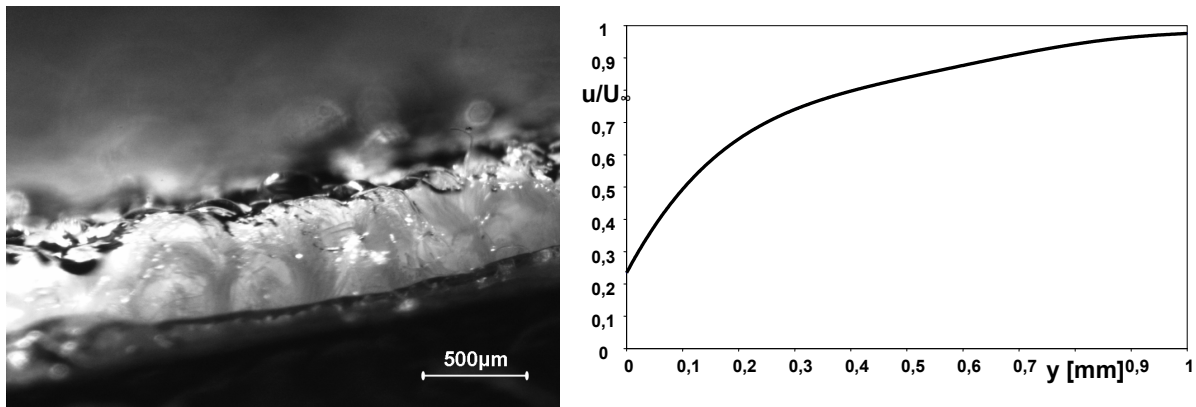


Abbildung 3: Oberflächenstruktur eines funktionalisierten textilen Gewebes in Wasser, mit Luftschicht (links), mit PIV gemessenes gemitteltes Geschwindigkeitsprofil an der textilen Oberfläche mit Luftschicht

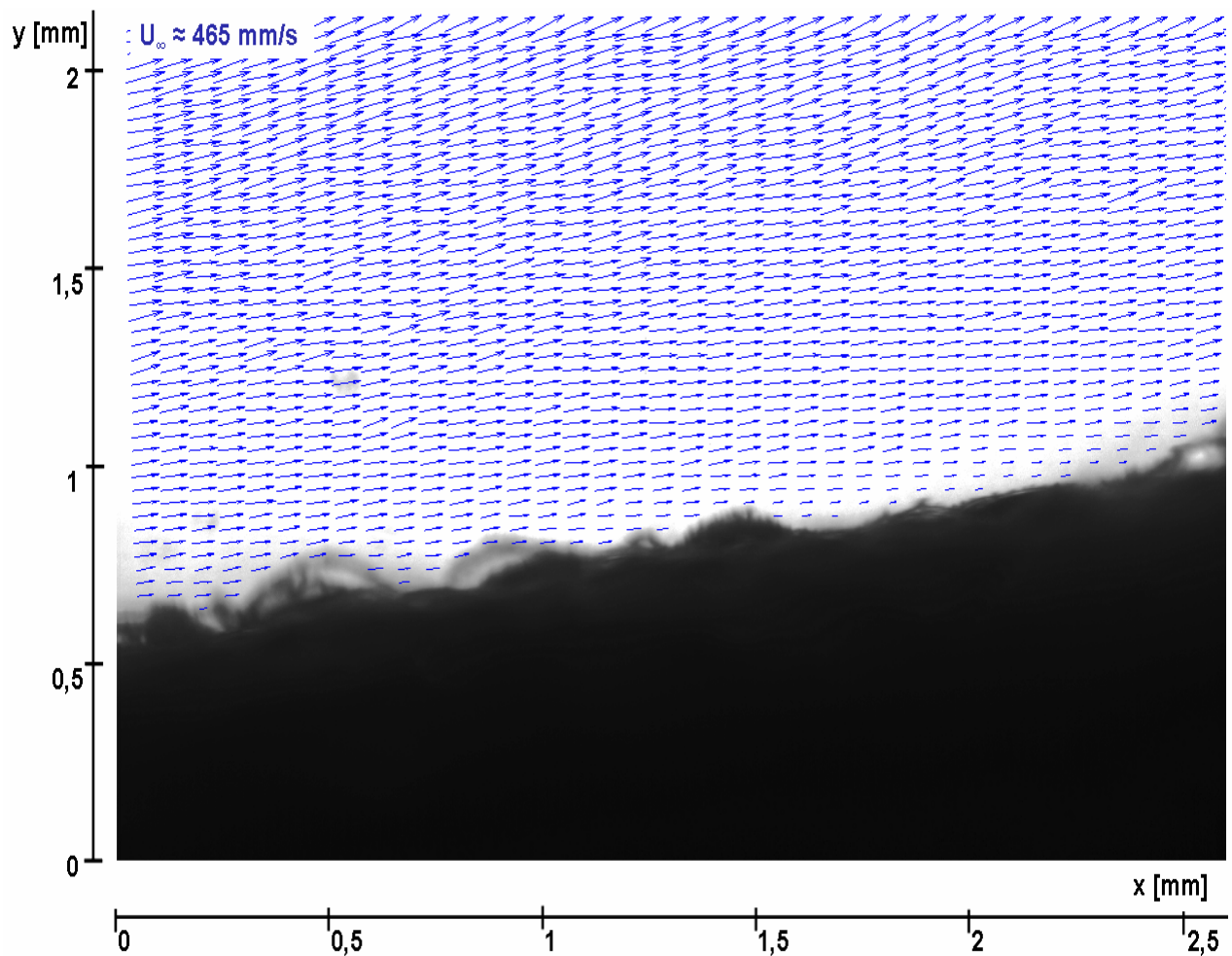


Abbildung 4: Instantanes, mit  $\mu$ PIV ermitteltes Geschwindigkeitsfeld bei der Textilumströmung

Abbildung 4 zeigt ein ebenfalls mit  $\mu$ PIV ermitteltes instantanes Geschwindigkeitsfeld. Es konnten hier wie auch in allen anderen gemessenen Feldern am Textil keine in die Wasserphase hineinreichenden Festkörperstrukturen beobachtet werden, alle Strukturen waren von einer Lufthülle umgeben. Es wurde keine Ablösung bzw. Rezirkulation festgestellt.

Im Detail konnte beim Vergleich der drei untersuchten biologischen Oberflächenstrukturen mit der synthetischen Struktur festgestellt werden, dass die superhydrophobe Blattoberfläche der unterschiedlichen *Salvinia*-Arten und das hydrophobierte Textil annähernd gleiche Verläufe des Geschwindigkeitsprofils bis zum Übergang zwischen der Wasser- und der Luftphase aufweisen. Die Profile, die sich aus 50 instantanen Geschwindigkeitsfeldern ergaben, sind in Abbildung 5 dargestellt. An der Grenzfläche selbst weisen die Strukturen von *Salvinia oblongifolia* und das Textil die höchsten Geschwindigkeitswerte auf.

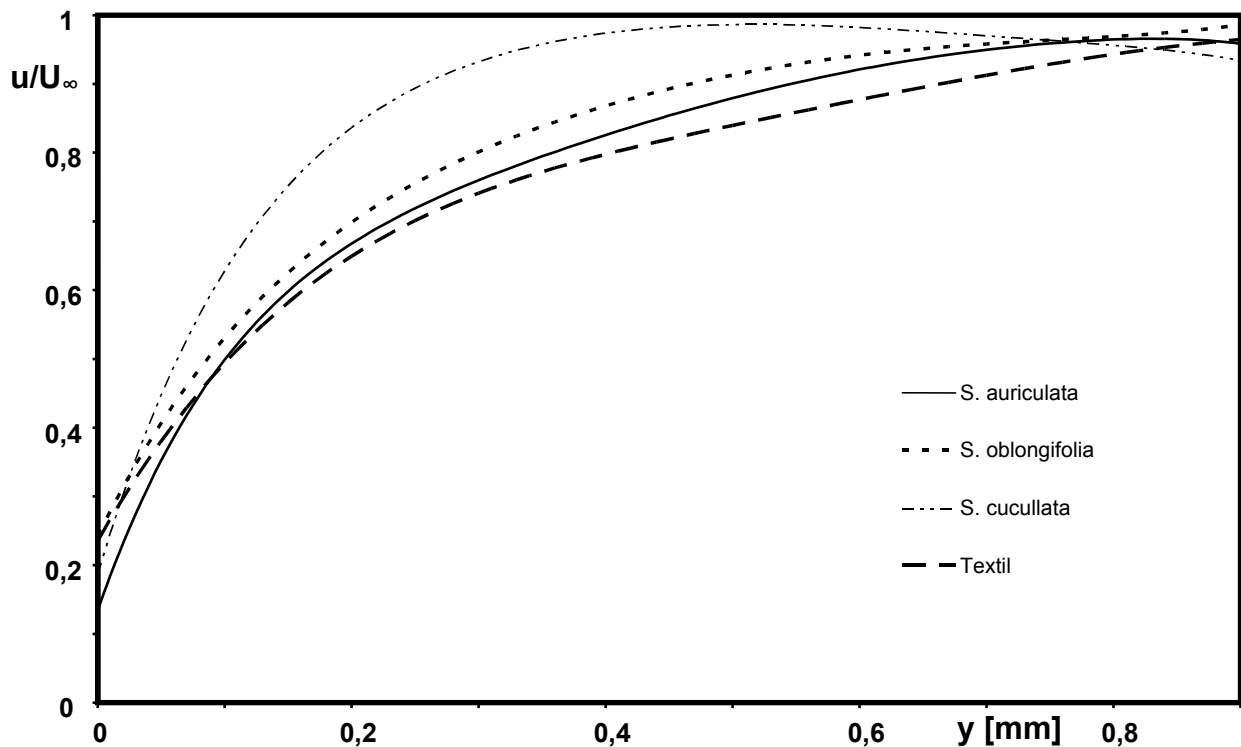


Abbildung 5: Vergleich der normierten, gemittelten Geschwindigkeitsprofile an Blättern dreier *Salvinia*-Arten und einem superhydrophoben, Luft haltenden Textil

Unterschiede erbrachte auch die Berechnung der Geschwindigkeitsgradienten an der Grenzfläche von *Salvinia oblongifolia* und des Textils im Vergleich mit den anderen *Salvinien*, die in Tabelle 1 zusammengefasst sind. Die Geschwindigkeitsverteilungen der beiden erstgenannten Oberflächen ergaben an der Luftschicht geringere Geschwindigkeitsgradienten als bei *Salvinia auriculata* und *Salvinia cucullata*. Demzufolge können auch geringere Schubspannungen an der Grenzfläche abgeleitet werden. Es ist zu erwarten, dass bei *Salvinia oblongifolia* und beim hydrophobierten Textil die Verringerung der Wandreibung bezüglich einer ebenen, glatten Oberfläche am höchsten sein wird.

	$u/U_\infty _G$	$\partial(u/U_\infty)/\partial y _G$
<b>Salvinia auriculata</b>	0,1337	5,28
<b>Salvinia oblongifolia</b>	0,2422	3,76
<b>Salvinia cucullata</b>	0,1865	6,20
<b>Textil</b>	0,2348	3,26

Tabelle 1: Vergleichswerte für die Geschwindigkeitskomponente  $u$  und den Gradienten an der Grenzfläche Wasser-Luft (G) aus den gemittelten Geschwindigkeitsprofilen

## Zusammenfassung

Nachdem erste Messungen mit einem  $\mu$ PIV System an Blättern von verschiedenen *Salvinien* durchgeführt wurden, erfolgte nun die Vergleichsmessung mit einem synthetischen Material in Form eines superhydrophobierten Textils.

Von den zuvor beobachteten zwei Mechanismen der Reibungsverminderung – zum einen die Ablösung an den Spitzen der Vertikalstrukturen und die daran anschließende Rezirkulationszone sowie zum anderen die Verringerung der Schubspannung im Bereich der Luft-Wasser Grenzfläche – konnte am Textil ausschließlich letzteres beobachtet werden. Bei der Auswertung der gemessenen Geschwindigkeitsprofile an der Luft-Wasser Grenzfläche zeigt sich, dass am Textil Grenzflächengeschwindigkeiten in mit den *Salvinien* vergleichbarer Größe auftreten. Gleichzeitig erreicht das Textil an der Grenzfläche eine Verringerung der wirksamen Schubspannung, die noch unter der des kleinsten Wertes für *Salvinien* liegt.

In der kommenden Versuchsperiode soll das Potential weiterer synthetischer Materialien zur Verringerung der Wandhaftung durch Luft haltende Schichten durch Messungen quantifiziert werden. Gleichzeitig erfolgt eine Analyse der Morphologie der Vertikalstrukturen.

## Literatur

- Barthlott, W. & Neinhuis, C., 1997: "Purity of the sacred lotus, or escape from contamination in biological surfaces", *Planta* 202, 1-8
- Brede, M.; Birkner, T.; Leder, A.; Barthlott, W. (2008): Strömungseigenschaften superhydrophober Luft haltender Oberflächen – Untersuchungen mittels  $\mu$ 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
- Brede, M., Witte, M. und Leder, A. 2006: Stereo-Micro PIV measurements of the three-dimensional separated flow in the wake of a backward facing step, *Proceedings of the 13th International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics*, Calouste Gulbenkian Foundation, Lisbon, 29. -29. Juni 2006
- Kodama, Y.; Takahashi, T.; Makino, M.; Hori, T. und Ueda, T. (2005). "Practical application of micro-bubbles to ships - Large scale model experiments and a new full scale experiment -". 6th International Symposium on Smart Control of Turbulence. Tokyo
- Merkle, C. L. und Deutsch, S. (1990). "Drag reduction in liquid boundary layers by gas injection". In Bushnell, D. M. and J. N. Hefner, eds. *Viscous drag reduction in boundary layers. Progress in astronautics and aeronautics*, vol 123. AIAA, Washington. American Institute of Aeronautics and Astronautics. Washington: 351-412.
- Solga, A.; Cerman, Z.; Striffler, B. F.; Spaeth, M. & Barthlott, W. (2007): "The dream of staying clean: Lotus and biomimetic surfaces" *Bioinspiration & Biomimetics* 2, 1-9