

## **STRÖMUNGSEIGENSCHAFTEN SUPERHYDROPHOBER LUFT HALTENDER OBERFLÄCHEN – UNTERSUCHUNGEN MITTELS $\mu$ PIV-TECHNIK**

### **FLOW PHENOMENA ON SUPERHYDROPHOBIC AIR RETAINING SURFACES**

**Martin Brede, 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, bionics, functional surfaces

#### **Zusammenfassung**

Superhydrophobe Oberflächen sind in der Natur bei verschiedenen Tier und Pflanzenarten verbreitet. Ihnen ist gemeinsam, dass sie nicht nur die Benetzung der eigentlichen Festkörperoberflächen verhindern, sondern darüber hinaus durch Ihre komplexe Oberflächenstruktur eine Luftschicht zwischen Festkörper und Fluid halten können, wenn sie untergetaucht werden. Die strömungsmechanischen Eigenschaften dieser Wasser – Luft – Festkörper-Grenzfläche sind nur unzureichend bekannt. Eine erste Studie (Striffler 2007) zeigt die Übertragbarkeit der Eigenschaften von biologischen Strukturen auf modellierte synthetische superhydrophobe Oberflächen zur technischen Anwendung.

Zur Untersuchung von Mikroströmungen wurde in den vergangenen Jahren an der Universität Rostock ein auf Stereo-Mikroskopietechnik basierendes Stereo- $\mu$ PIV-System entwickelt. Mit diesem Stereo- $\mu$ -PIV System ist es erstmals möglich, instantane Felder des vollständigen Geschwindigkeitsvektors (u,v,w) in einer Mikroströmung zu bestimmen (Brede et al. 2006, 2007). Wie Voruntersuchungen mit dem System gezeigt haben, ist es möglich, Felder bis zu minimalen Abmessungen von  $400\mu\text{m} \times 500\mu\text{m}$  mit etwa 2000 enthaltenen dreikomponentigen Vektoren zu erfassen. Dieses System wird nun eingesetzt, um systematisch die Strömungseigenschaften verschiedener superhydrophober Oberflächen mit variablen Konstruktionsparametern zu erfassen.

#### **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 einer biologischen Oberfläche zu halten. Diese Fähigkeit 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.

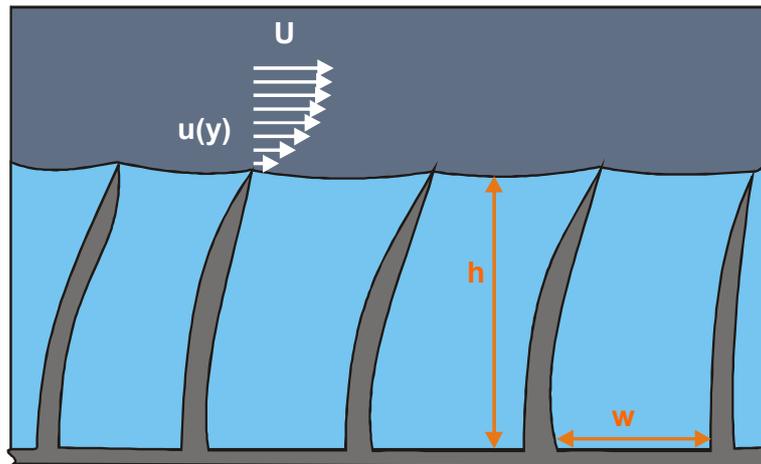
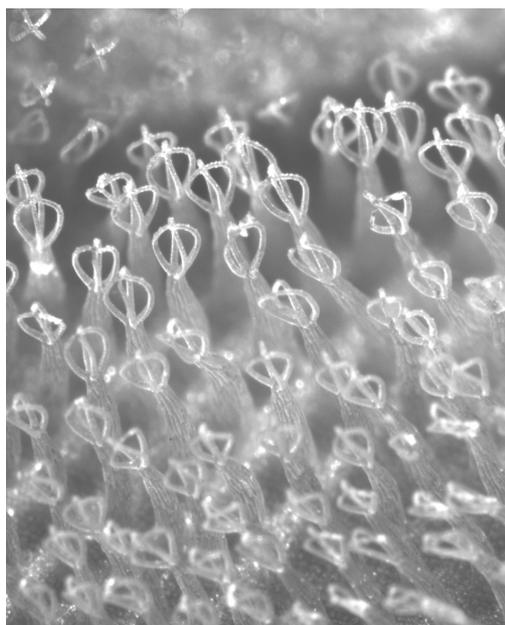


Abb. 1: Oberflächenstruktur von superhydrophoben lufthaltenden Oberflächen

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, lufthaltende Oberflächen sind die Blätter der Schwimmfarns *Salvinia*. An einer dieser *Salvinia*-Arten (*Salvinia auriculata*) sind die Vertikalstrukturen besonders stark ausgeprägt und gleichzeitig an der Spitze in Schlaufen verzweigt, wie in Abbildung 2 deutlich zu erkennen ist. An den Blättern von *Salvinia auriculata* wird nun, wie bereits in der schematischen Darstellung in Abbildung 1 gezeigt, ein Luftfilm gehalten, der selbst dann erhalten 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 sind jedoch noch unbekannt,



Die Modifizierung der Haftbedingungen an einer benetzten Oberfläche ist ein etabliertes Forschungsthema im Schiffbau. Mehrere Versuche wurden unternommen, beispielsweise mit Blasenenerzeugung 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.

Abb. 2: Oberflächenstruktur von *Salvinia auriculata*

## Versuchstechnik

Erste Versuche an superhydrophoben lufthaltenden 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. Das Objektiv ist ein Leica planapo 2x mit einem Objektstand von 15 mm. Die Beleuchtung ist mit einer gepulsten Lichtquelle im Durchlichtverfahren realisiert. 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 *Salvinia* Blattausschnitte von ca. 5 mm x 5 mm wurden adhäsiv auf einem Kunststoffträger befestigt und im Versuchskanal tangential angeströmt. Das Bildfeld liegt dabei senkrecht zur Blattoberfläche parallel zur Anströmung.

## Ergebnisse

Erste Messungen wurden an *Salvinia auriculata* Blättern durchgeführt, die mit Strömungsgeschwindigkeiten zwischen 0,2 und 0,8 m/s tangential angeströmt wurden. Zwei Aspekte stehen im Vordergrund der laufenden Untersuchung. Dies ist zum einen die Haltbarkeit der Luftschicht unter verschiedenen Versuchsbedingungen.

In den ersten Messungen ist deutlich eine Abnahme der Luftschichtdicke aufgrund zweier unterschiedlicher Vorgänge zu erkennen. Es kommt einerseits zu einem Abtrag der Luftschicht in Abhängigkeit von der Strömungsgeschwindigkeit. Einen Vergleich der *Salvinia*-Oberfläche bei haftender Luftschicht bei einer Anströmung von  $U = 0,6$  m/s und bei abgetragener Luftschicht bei  $U = 0,8$  m/s zeigt Abbildung 3.

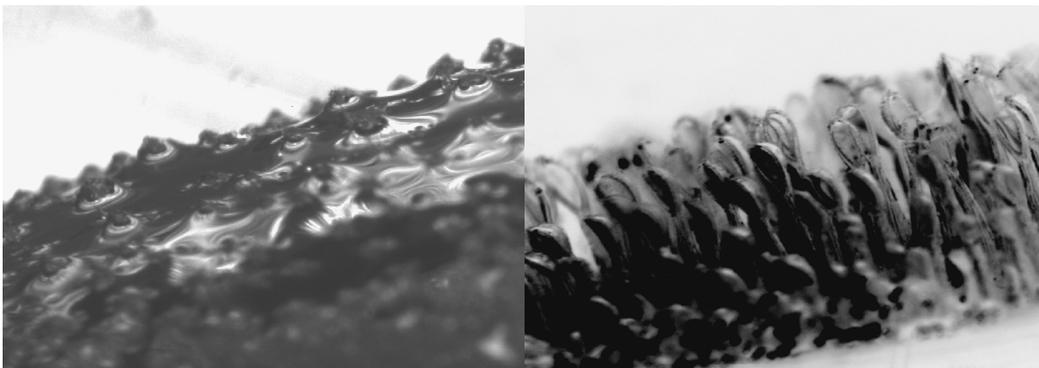


Abb. 3: Oberfläche von *Salvinia auriculata* bei  $U = 0,6$  m/s (links) und bei  $U = 0,8$  m/s (rechts)

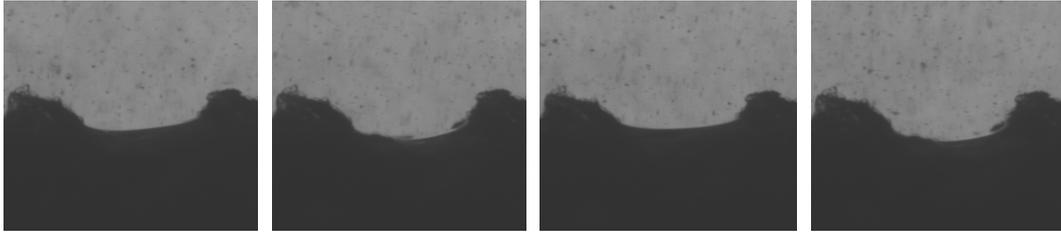


Abb. 4: Vibration der Luft-Wasser-Grenzfläche,  $U = 0,6 \text{ m/s}$ ,  
Aufnahmen bei  $t = 0\text{s}$  (links) bis  $t = 6\text{s}$  (rechts)

Andererseits kommt es, wie in Abbildung 4 gezeigt, bei haltender Luftschicht zu einer Schwingung der Wasser/Luft Grenzfläche. Diese Schwingung erschwert nicht nur die Mittelung von PIV-Geschwindigkeitsfeldern, sondern führt auch zu einem Abtrag der Luftschicht mit der Laufzeit des Strömungsexperiments. Weitere Untersuchungen sollen einen quantitativen Zusammenhang zwischen dem Luftschichtabtrag und den Parametern Zeit und Strömungsgeschwindigkeit ergeben.

Der zweite Aspekt betrifft die in Vorversuchen gezeigte Fähigkeit von superhydrophoben lufthaltenden Strukturen zur Verminderung des reibungsbedingten Strömungswiderstandes (Striffler 2007). Zwei Phänomene zur Reibungsverringerung konnten in den aktuellen Versuchen beobachtet werden.

Dies ist einerseits das Auftreten von Rezirkulationsgebieten im Nachlauf der Spitzen der Vertikalstrukturen. Abbildung 5 zeigt einen Ausschnitt von  $900 \mu\text{m}$  Länge in Strömungsrichtung zwischen zwei Spitzen. In der Senke dazwischen bildet sich ein Rezirkulationsgebiet aus. Im Ergebnis werden in diesem Blattbereich, bedingt durch den verringerten Geschwindigkeitsgradienten, an der Grenzfläche geringere Reibungskräfte übertragen als an einem unstrukturierten Blatt.

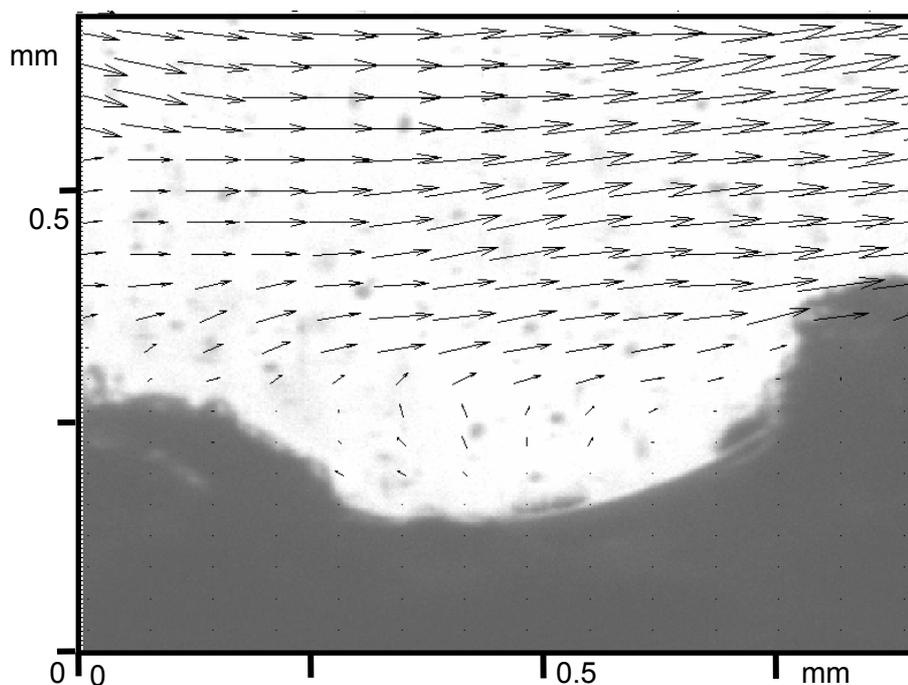


Abb. 5: Ablösung hinter einem Blatthaar  $U = 0,6 \text{ m/s}$ , momentanes Geschwindigkeitsfeld

Es finden sich jedoch auch Bereiche mit anliegender Luftschicht ohne Rezirkulation wie im Geschwindigkeitsfeld in Abbildung 6 bei  $x = 2400 \mu\text{m}$  dargestellt. Wird das zeitgemittelte Geschwindigkeitsprofil an dieser Stelle ausgewertet, findet man  $u = 0,2 \text{ m/s}$  an der Wasser-Luft-Grenzfläche, siehe Abbildung 7. Das deutet an, dass auch hier, bedingt durch ein Gleiten der Wasserschicht an der Wasser-Luft Grenzfläche, der Geschwindigkeitsgradient und damit die Reibungsspannungen verringert sind.

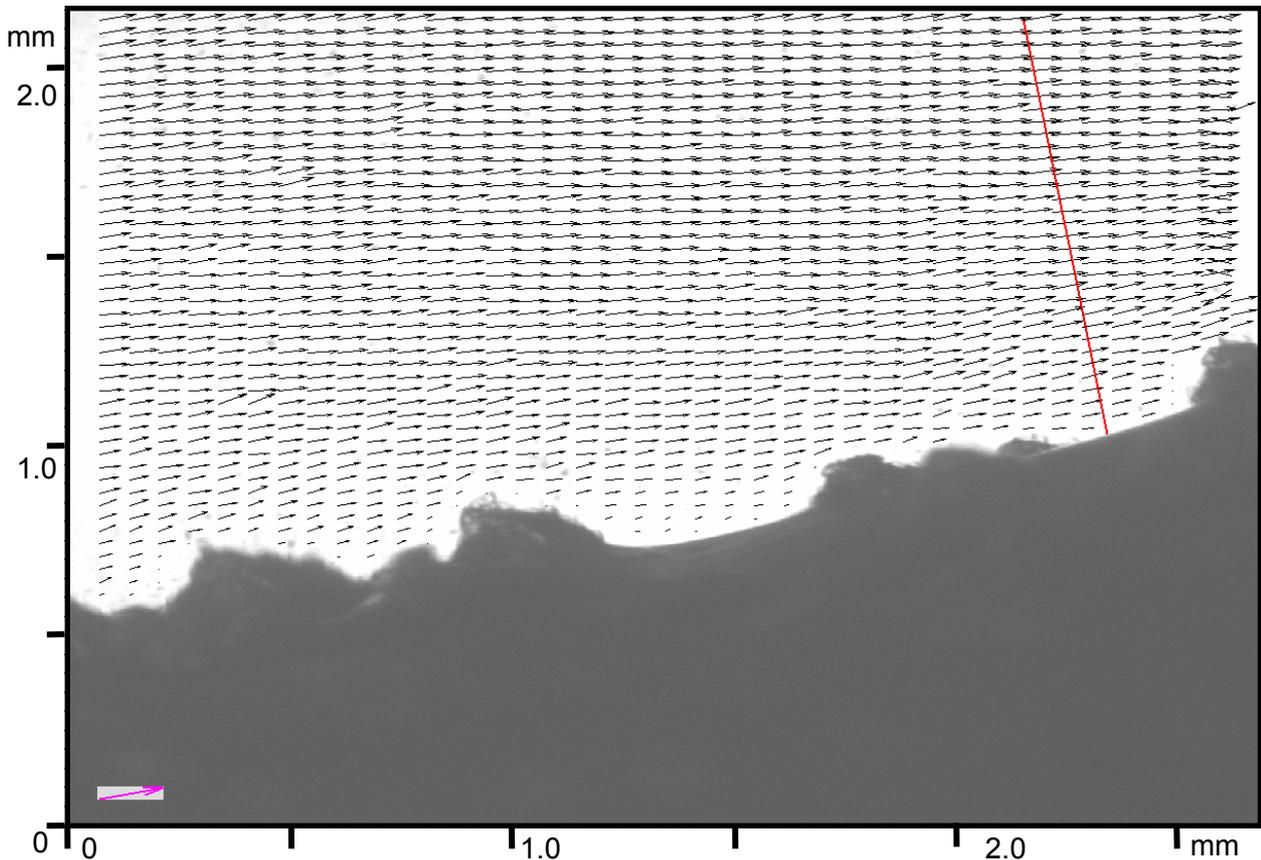


Abb. 6: Zeitgemitteltes Geschwindigkeitsfeld an einer *Salvinia*-Oberfläche,  $U = 0,6 \text{ m/s}$ ,  $U_{\text{ref}} = 1,0 \text{ m/s}$

### Zusammenfassung

Erste Messungen konnten mit einem  $\mu\text{PIV}$  System an Blättern von *Salvinia auriculata* durchgeführt werden. Die Messungen zeigen eine deutliche Grenze der Haftungsfähigkeit der blattgebundenen Luftschicht hinsichtlich der Strömungsgeschwindigkeit. Auch bei haftender Luftschicht erfolgt ein langsamer Abtrag durch Vibration der Luftschicht. Es konnten weiterhin zwei Mechanismen der Reibungsverminderung identifiziert werden. Dies sind zum einen die Ablösung an den Spitzen der Vertikalstrukturen und die daran anschließende Rezirkulationszone sowie zum anderen die Verringerung der Haftung der flüssigen Phase im Bereich des Luft-Wasser Grenzfläche.

In der kommenden Versuchsperiode soll das Potential von *Salvinia* zur Verringerung der Wandhaftung durch lufthaltende Schichten durch weitere, detaillierte Messungen quantifiziert werden.

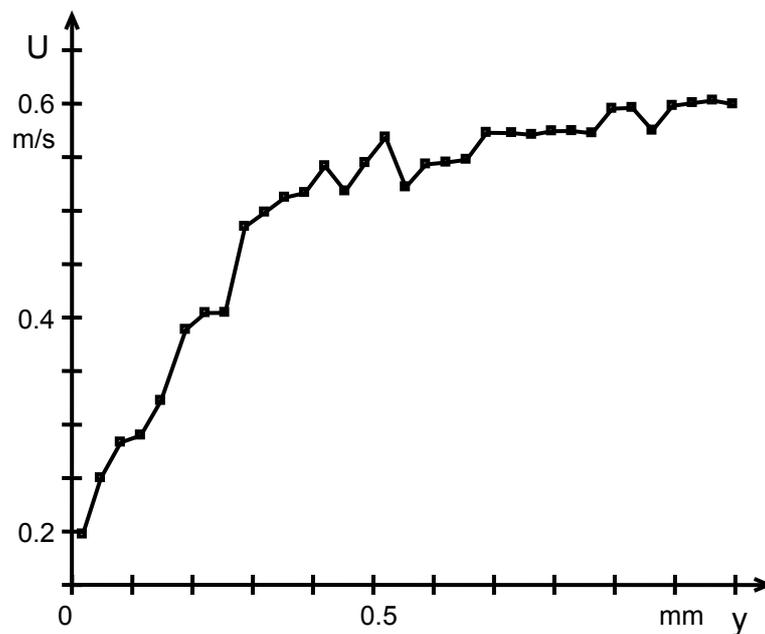


Abb. 7: Geschwindigkeitsprofil entlang der Grenzflächennormalen (siehe markierte Linie in Abb. 6) an einer Wasser-Luft-Grenzfläche bei  $y = 0$  mm

## Literatur

- Barthlott, W. & Neinhuis, C., 1997: "Purity of the sacred lotus, or escape from contamination in biological surfaces", *Planta* 202, 1-8
- Brede, M., Witte, M., Dehnhardt, G. und Leder, A. 2007: Experimentelle Untersuchung biologischer Mikroströmungen mittels Stereo- $\mu$ PIV, in: A. Leder, M. Brede, F. Hüttmann, B. Ruck, D. Doppeide (Hrsg.), *Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik*, 15. Fachtagung der GALA e.V. 2007, Universität Rostock, S. 53.1-53.8
- 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., T. Takahashi, M. Makino, T. Hori und T. Ueda (2005). "Practical application of microbubbles 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 S. Deutsch (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
- Striffler, B. F. 2007: "Biologische superhydrophobe Grenzflächen - Technische Potenziale für Unterwasseranwendungen" In Brickwedde, F., ed. *Bionik und Nachhaltigkeit – Lernen von der Natur / 12. Internationale Sommerakademie St. Marienthal*. 12. Erich-Schmidt-Verlag. Berlin: 69-75.