

REIBUNGSREDUKTION DURCH KÜNSTLICHE LUFTHALTENDE OBERFLÄCHEN NACH BIOLOGISCHEM VORBILD

DRAG REDUCTION ON ARTIFICIAL AIR RETAINING SURFACES BASED ON A BIOMIMETIC MODEL

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

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

¹ Universität Bonn, Nees-Institut für Biodiversität der Pflanzen, Meckenheimer Allee 170, 53115 Bonn

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

Zusammenfassung

In der Natur verhindern superhydrophobe Oberflächen bei verschiedenen Tier- und Pflanzenarten die Benetzung der eigentlichen Festkörperoberflächen selbst dann, wenn sie untergetaucht werden. Die Übertragbarkeit der Eigenschaften von biologischen Strukturen auf modellierte synthetische superhydrophobe Oberflächen auf die technische Anwendung konnten bereits gezeigt werden (Solga et al. 2007). Verschiedene Produkte mit entsprechenden Eigenschaften befinden sich bereits in der kommerziellen Vermarktung. Die strömungsmechanischen Eigenschaften dieser Oberflächen wurden mit dem in den vergangenen Jahren an der Universität Rostock entwickelten Stereo- μ PIV-System (Brede et al. 2006, 2008) ermittelt. Erste Ergebnisse für gleichförmig strukturierte, künstliche Oberflächen zeigen ein ähnliches Strömungsverhalten in der Nähe der Grenzfläche zwischen der Wasserphase und der gehaltenen Luftschicht in Wandnähe wie bei biologischen Oberflächen vom Wasserfarn *Salvinia*.

Einleitung

Bei der Untersuchung verschiedener biologischer Oberflächen lässt sich feststellen, dass im Laufe der Evolution viele davon funktionalisiert ausgebildet wurden. Von besonderem Interesse sind dabei jene, die durch eine Mikro- und Nanostrukturierung gekennzeichnet sind und sich durch besonders große Benetzungswinkel gegenüber Wasser auszeichnen. Aus der Botanik ist dazu als Beispiel das Blatt der Lotuspflanze (*Nelumbo nucifera*, Barthlott & Neinhuis 1997) zu nennen, das durch eine Oberflächenstrukturierung das Ablösen von Staubpartikeln mittels Wasser erleichtert und damit eine permanent saubere Blattfläche präsentiert. Erreicht wird dieser Effekt durch das Zusammenspiel von Mikrostrukturen auf der Blattoberfläche, die ihrerseits mit Wachskristallen als Nanostrukturen überzogen sind. Die Oberfläche weist insgesamt superhydrophobe Eigenschaften auf, die sich durch eine sehr kleine Kontaktfläche zwischen Blatt und Wassertropfen auszeichnet. Ein Wassertropfen kann somit sehr leicht abperlen, dabei löst er gleichzeitig Staubpartikel und transportiert sie ab. Ein weiteres Beispiel für das Zusammenwirken von Mikro- und Nanostrukturen lässt sich an der Oberfläche des Schwimmfarns *Salvinia* erläutern. Hier liegen vertikale Strukturen im Größenbereich von einigen hundert Mikrometern bis zu einigen Millimetern vor, die mit Wachsen verschiedener Eigenschaften überzogen sind. Neben der superhydrophoben

Eigenschaft, ist der Salvinia-Farn in der Lage unter Wasser eine feine Luftschicht zwischen diesen Strukturen zu halten. Die hydrophobe Eigenschaft der Strukturen ist dabei sowohl durch ihren Wachsüberzug als auch durch ihre Formgebung bedingt. Diese bewirkt, dass das Wasser nur sehr schwer zwischen die Vertikalstrukturen dringen kann, wobei auch die Oberflächenspannung des Wassers die Benetzung verhindert. Neueste Untersuchungen des Nees-Instituts Bonn und anderer hinsichtlich der chemischen Eigenschaften der Wachskristalle haben zudem zeigen können, dass hydrophile Bereiche an den Strukturspitzen ausgebildet sind („Salvinia-Effekt“, Barthlott et al., 2010). An diesen Stellen ist somit eine punktuelle Benetzung mit Wasser von der Natur vorgesehen, vermutlich um die Luft-Wasser Grenzfläche, deren Kontur der eines Zirkuszelts ähnelt, zwischen den Strukturen stabilisieren zu können, siehe Abb. 1.

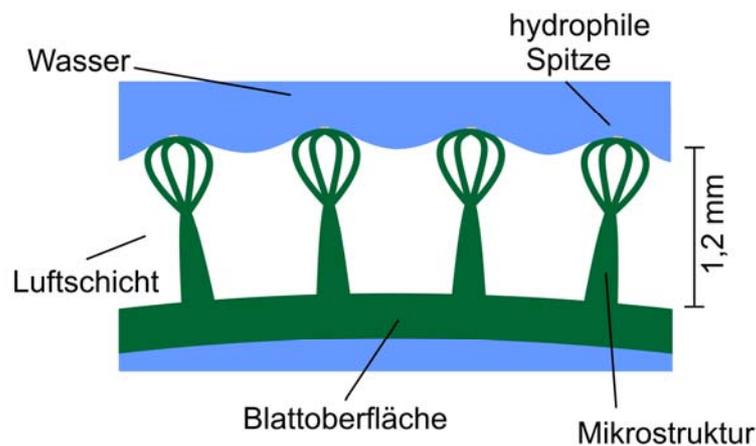


Abb. 1: Schematischer Aufbau einer lufthaltenden Oberfläche mit hydrophilen Spitzen an den Strukturen eines *Salvinia molesta* Blattes

Die prinzipielle Funktionsweise bei der Überströmung des Blattes lässt sich anschaulich am Beispiel *Salvinia cucullata* erklären, die vollständig unter Wasser getaucht, eine Luftschicht hält. Abbildung 2 stellt schematisch den Aufbau der Oberfläche dar, welche im Bereich zwischen den Strukturen Luft aufweist; an und oberhalb der Strukturspitzen ist Wasser. An dieser Wasser-Blatt- bzw. Wasser-Luft-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 bislang noch unbekannt.

Durch die Luftschicht zwischen der eigentlichen Oberfläche und dem Wasser ist eine Verringerung der Haftreibung zu erwarten. Eine technische Umsetzung dieses Prinzips ist besonders für den Schiffbau interessant, da hier durch eine Beeinflussung der Haftbedingung am Rumpf ein besonders großes Einsparpotential bei der Antriebsleistung anvisiert werden kann. Frühere Versuche, beispielsweise einen Blasenteppich an der Schiffsaußenwand zu erzeugen und dadurch die Haftreibung zu reduzieren, erwiesen sich als unökonomisch (Merkle & Deutsch 1990, Kodama, et al. 2005). Dieses war letztlich auch dem Umstand geschuldet, dass ein hoher Anteil der eingesparten Energie für die Erzeugung des Blasenteppichs aufgewendet werden muss.

Die Entwicklung künstlicher funktionaler Oberflächen, die dem „Salvinia-Effekt“ folgen, also eine Luftschicht direkt an einer Oberfläche, auch unter Strömungsbelastung, unter Nutzung hydrophiler Spitzen halten zu können, birgt die Möglichkeit für getauchte Körper, den Reibungswiderstand und somit auch den Bedarf an Antriebsenergie zu reduzieren.

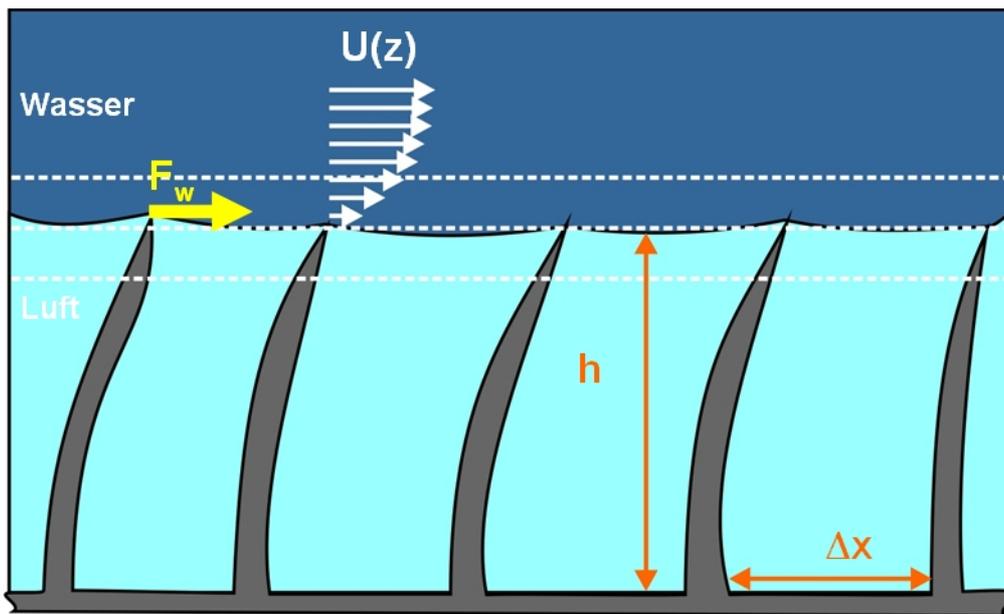


Abb. 2: Schematische Darstellung des Geschwindigkeitsverlaufes an einer lufthaltenden Oberfläche

Messsystem

Als Messsystem der Universität Rostock wird das bereits vorgestellte Mikro-PIV-System des Lehrstuhls Strömungsmechanik verwendet (Brede et al. 2008). Das System besteht aus einer Dantec Hi-Sense PIV-Kamera mit 1280 x 1024 Pixel Auflösung, die auf einem Zeiss Stemi 11 Mikroskop montiert ist. Um einen möglichst großen Arbeitsabstand zu realisieren, ist ein Leica planapo 2x Objektiv mit einem Objektabstand von 15 mm am Mikroskop installiert. Als Streuteilchen werden Polyamidpartikel verwendet, die im Durchlichtverfahren von einer gepulsten Lichtquelle beleuchtet werden. 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 μm x 500 μm mit einer Abtastfleckengröße bis zu minimal 12 μm x 12 μm verarbeitet werden. Hier wurde eine Bildfeldgröße von rund 2,1 mm x 2,7 mm verwendet.

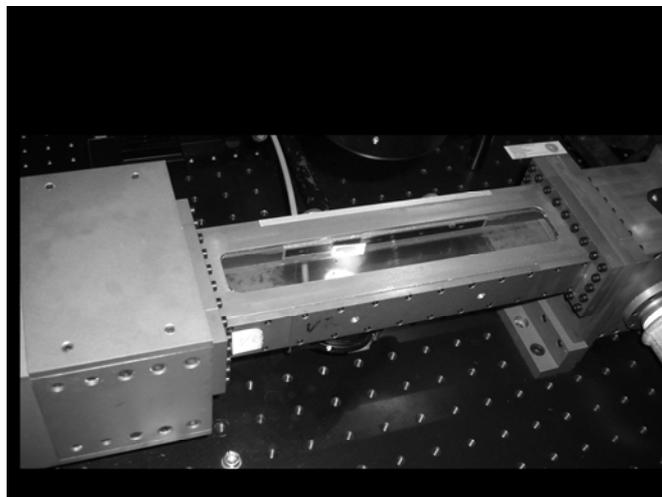


Abb. 3: : Neuer Mikrokanal am LSM , mit eingesetzter Probe im Durchlichtverfahren

Die Messungen werden in einem speziell gefertigten Mikrokanal durchgeführt (Abb. 3). Dieser Kanal ist neu konzipiert und durch eine besonders turbulenzarme Strömung gekennzeichnet; er besitzt einen Messstreckenquerschnitt von 15 mm x 30 mm. Die Probenhalterung erfolgt über in die Kanalwand verschraubte, modular austauschbare Trägerelemente. Sie weisen eine geringe Versperrung des Kanals auf und ermöglichen die adhäsive Befestigung von natürlichen und synthetisch hergestellten Oberflächenproben. Die Trägerelemente sind so ausgelegt, dass eine tangentielle Anströmung der Oberfläche erfolgt; dabei liegt das Blickfeld parallel zur Anströmung und senkrecht zur Oberfläche.

Die Positionierung des auf einer Grundplatte montierten Kanals erfolgt über zwei Präzisionstraversen vom Typ Newport M-MTM 200PP.1. Der Mikroskopaufbau wird unabhängig dazu von einer Traverse vom Typ Newport M-IMS100V mit einer Wiederholgenauigkeit von 0,3 µm verfahren. Die drei Traversen bilden dabei ein kartesisches Koordinatensystem.

Oberflächenmaterial

Wie einleitend beschrieben, lässt sich das Phänomen der Lufthaltung unter Wasser beim Schwimmpflanz *Salvinia* besonders gut beobachten (Brede et al. 2008). Von der Grundstruktur inspiriert, ist im Auftrag des Nees-Instituts in Bonn ein Silizium-Wafer mit einer geätzten Säulenstruktur gefertigt worden (Abb. 4). Die Abmaße der Säulen sind 10 µm im Durchmesser, 30 µm in der Höhe und 40 µm als Abstand der Mittelpunkte in quadratischer Anordnung. Anhand dieser, von den Blattoberflächen abstrahierten und idealisierten Struktur, sollen erste Versuche an systematisch aufgebauten Oberflächen erfolgen. Um eine Nutzung im Mikrokanal zu ermöglichen, werden zur Befestigung auf den Trägerelementen Repliken der Oberflächen aus Epoxydharz in den passenden Abmaßen erstellt. Um den Effekt der Superhydrophobie zu erzielen, sind die Repliken anschließend mit teilfluoriertem Ether hydrophobisiert. Eine Nanostrukturierung mit Silikatpartikeln ist hierbei nicht vorgesehen. Da bisher noch keine technisch umsetzbare Lösung für das Aufbringen von hydrophilen Spitzen gefunden ist, stehen Messungen an diesen Oberflächen noch aus.

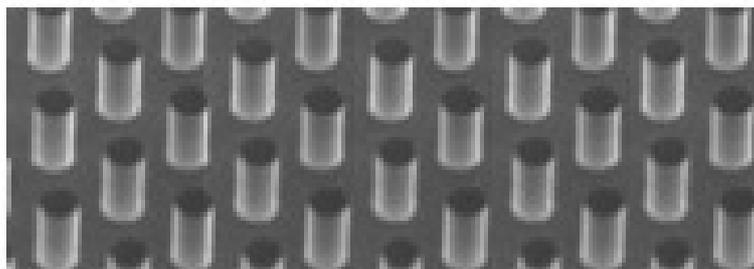


Abb. 4: Mikrostrukturierte Säulenoberfläche, Säulenhöhe: 30µm, Säulendurchmesser: 10µm

Ergebnisse

Die ersten Messungen an den künstlichen Säulenoberflächen erfolgten bei Strömungsgeschwindigkeiten zwischen 0,3 und 0,5 m/s tangential zur Oberfläche. Bei den laufenden Untersuchungen stehen sowohl der Aspekt der Haltbarkeit der Luftschicht (Persistenz) unter verschiedenen Versuchsbedingungen, als auch die Eigenschaften der gegebenen Oberflächen zur Verminderung von Reibungsverlusten im Vordergrund.

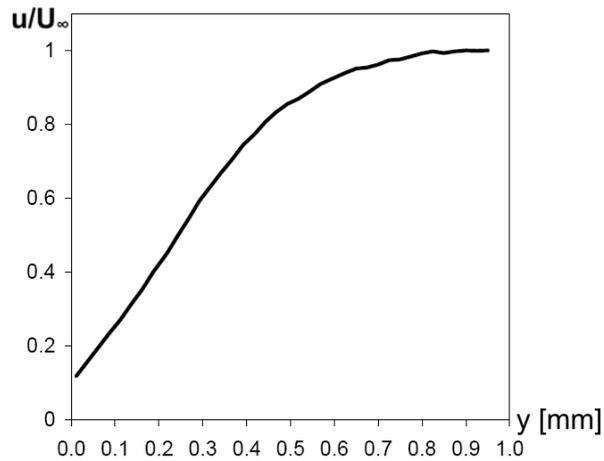


Abb. 5: Über die Anströmgeschwindigkeit normierter Geschwindigkeitsverlauf oberhalb der B Säulenfläche

Zunächst ist festzuhalten, dass bei den Oberflächen mit Säulenstrukturen im Vergleich zu vorherigen Arbeiten an verschiedenen Salvinien und einem hydrophoben Textil (Brede et. al, 2009) eine deutlich geringere Lufthaltedauer im hydrostatischen, wie auch im hydrodynamischen Fall auszumachen ist. Während an den Pflanzenblättern über Wochen, an dem Textil immerhin noch über Tage hinweg ein geschlossener Luftfilm ausgemacht werden kann, beginnt die Säulenoberfläche, schnell Luft zu verlieren. Eine Möglichkeit dieses zu erklären, liegt in der regelmäßigen Struktur. Sobald an einer Stelle, vornehmlich im Randbereich, Wasser in die Oberfläche eindringt, kann seitlich zwischen den Säulen keine Wasser-Luft-Grenzschicht ausgebildet werden, die ein weiteres Eindringen von Wasser in die mit Luft gefüllten Zwischenräume verhindert. Die Oberflächenstruktur füllt sich langsam mit Wasser, die Luft wird verdrängt und löst sich als kleine Bläschen von der Oberfläche. Je nach Randbedingungen bleibt somit ein Zeitfenster von maximal 60 Minuten, um hydrodynamische Messungen an einer Wasser-Luft-Grenze im Kopfbereich der Säulen durchzuführen.

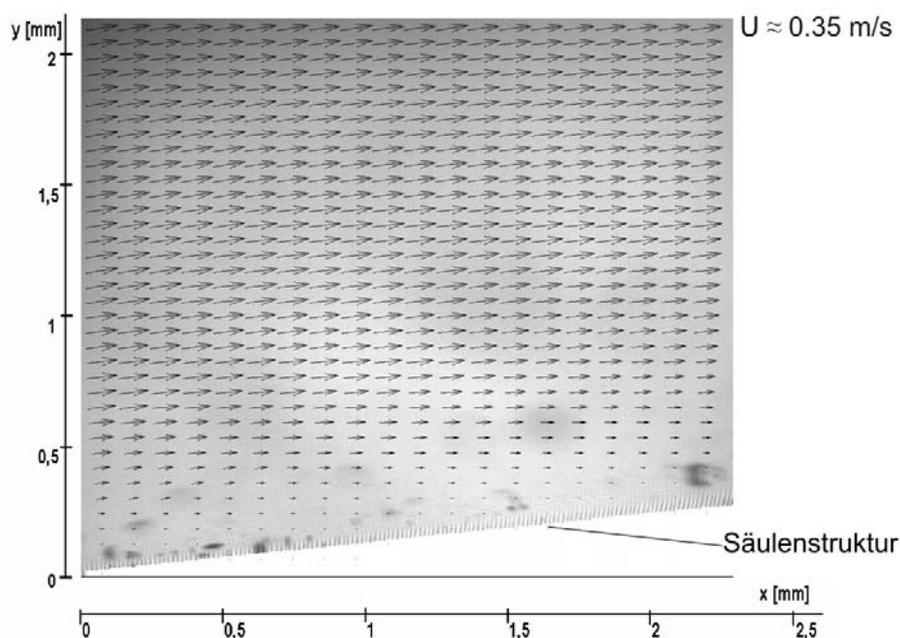


Abb. 6: Instantanes, mit μ PIV ermitteltes Geschwindigkeitsfeld bei der Textilumströmung

Die hydrodynamischen Messungen erfolgen in dem oben beschriebenen Versuchskanal. Die Auswertung erfolgt über zeitgemittelte Geschwindigkeitsprofile an einer Stelle. Dabei zeigt sich bei der Säulenoberfläche, dass die Geschwindigkeitsbeträge an der Wasser-Luft-Grenzfläche etwa noch 15% der Anströmgeschwindigkeit aufweisen (Abb. 5 u. 6). 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.

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., 2010: "The Salvinia Paradox: Superhydrophobic Surfaces with Hydrophilic Pins for Air Retention Under Water", *Adv. Mater.* 2010, 22, 1–4
- Brede, M.; Melskotte, J.-E., Birkner, T.; Leder, A.; Barthlott, W., 2009: „Biomimetische superhydrophobe Luft haltende Oberflächen zur technischen Anwendung“, in: A. Leder, B. Ruck, D. Dopheide (Hrsg.), *Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik*, 17. Fachtagung der GALA e.V. 2009, Erlangen: Deutsche Gesellschaft für Laser-Anemometrie, S. 22.1-22.7
- 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
- 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 as-tronautics and aeronautics, vol 123. AIAA, Washington. American Institute of Aeronautics and As-tronautics. 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