

## KÜNSTLICHE LUFT HALTENDE OBERFLÄCHEN ZUR REIBUNGSREDUKTION AM SCHIFF

### ARTIFICIAL AIR RETAINING SURFACES FOR DRAG REDUCTION ON SHIPPHULLS

Jan-Erik Melskotte, Martin Brede, Alexander Ott, Matthias Mayser<sup>1</sup>, Wilhelm Barthlott<sup>1</sup>  
& Alfred Leder

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

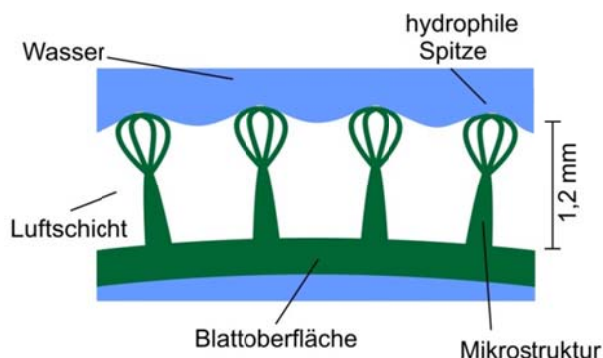
In der Seeschifffahrt entfällt ein Großteil der Betriebskosten auf Brennstoff zum Antrieb des Schiffs, der den Widerstand durch die Form des Schiffes und die Reibung von Wasser am Rumpf für Vortrieb überwinden muss. Ein Vorbild für die Verringerung der Reibung am Schiffsrumpf könnten Luft haltende biologische Systeme wie die Schwimmfarn der Gattung *Salvinia* sein. An ihrer Oberflächen tritt ein außergewöhnlicher Effekt auf, der den Wasserkörper mit einem Luftfilm abgegrenzt und so eine Benetzung des Objekts verhindert. Diese superhydrophoben Luft haltenden Oberflächen können durch eine Übertragung des Wirkprinzips auf eine künstlich hergestellte Oberfläche Ansätze zur Reibungsverminderung am Schiffsrumpf darstellen. Um die Vorgänge beim Aufbau einer solchen Wasser-Luft Grenzfläche besser beurteilen zu können werden numerische Simulationen an von Salvinien approximierten Geometrien unter Berücksichtigung der in der Natur auftretenden verschiedenen Oberflächenchemien vorgenommen.

#### Einleitung

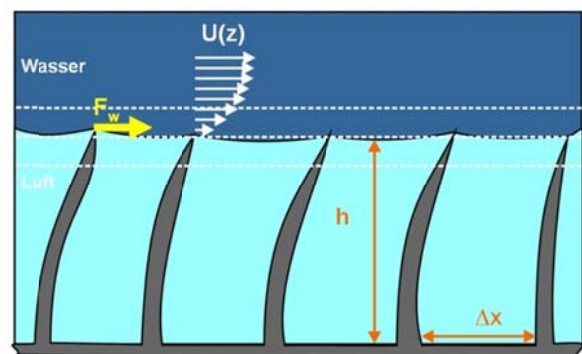
Für superhydrophobe Oberflächen lassen sich in der Natur viele Beispiele finden. Oberflächen mit diesem Merkmal treten sowohl bei verschiedenen Arten von Tieren als auch Pflanzen auf und sind durch das Zusammenwirken von hierarchischer Strukturen mit Mikro- und Nanostrukturen und einer hydrophoben Oberflächenchemie gekennzeichnet (Koch 2010, Yan 2011). Als Beispiel für das besondere Verhalten superhydrophober Oberflächen ist hier der Lotus-Effect® (Barthlott 1997) zu nennen, der es ohne Zusatz von Tensiden ermöglicht, Oberflächen einfach von Verschmutzungen mittels Wasser zu reinigen. Schmutzpartikel werden hierbei durch das Wasser aufgenommen, die einzelnen Wassertropfen können die Oberfläche jedoch nicht benetzen und perlen mit dem gebundenen Schmutz ab. Diese besondere Eigenschaft des Lotus-Effects® ist für technische Anwendungen hochgradig interessant und besitzt ein großes wirtschaftliches Potential.

Mit der Oberfläche des Schwimmfarns *Salvinia* lässt sich ein weiteres Beispiel für das Zusammenwirken von hierarchischen Strukturen nennen. Bei den subtropisch/tropischen, beinahe weltweit verbreiteten Schwimmfarnen liegen vertikale Strukturen im Größenbereich von einigen hundert Mikrometern bis zu einigen Millimetern vor, die mit Wachsen im

Größenbereich von Nanometern überzogen sind. Dadurch ist der Salvinia-Farn in der Lage, unter Wasser eine feine Luftschicht zwischen den Oberflächenstrukturen zu halten. Die Formgebung der Strukturen in Zusammenwirken mit dem Wachsüberzug führt in diesem Fall zu den superhydrophoben Luft haltenden Eigenschaften. Wasser kann nur unter besonders ungünstigen Bedingungen zwischen die Vertikalstrukturen dringen; die Oberflächenspannung des Wassers selbst verhindert die Benetzung der Struktur. Untersuchungen des Nees-Instituts Bonn und anderer (Barthlott et al. 2010) hinsichtlich der Oberflächenchemie bei *S. molesta* haben zudem zeigen können, dass an den Strukturspitzen hydrophile Bereiche ausgebildet sind. Das Wasser wird an diesen Stellen durch die Benetzung der Spitzen an die Struktur gebunden und verhindert somit ein Abschnüren von Luftblasen. Die Wasser-Luft Grenzfläche, deren Kontur der einer Zeltkonstruktion ähnelt (siehe Abb. 1), wird somit zwischen den Vertikalstrukturen stabilisiert.



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



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

Für den Fall einer von Wasser überströmten superhydrophoben Luft haltenden Oberfläche lässt sich zeigen, dass die Wasser-Luft Grenzfläche besondere Eigenschaften auf das Geschwindigkeitsfeld oberhalb der Luftschicht hat. 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. Anwendungstechnisch betrachtet stellt der Luftfilm an der Oberfläche eine Möglichkeit dar, das Gleiten eines Körpers durch das Wasser zu ermöglichen. Das Auftreten dieses Gleitens konnte am Lehrstuhl Strömungsmechanik der Universität Rostock an verschiedenen Oberflächen natürlicher Herkunft und künstlicher Herstellung durch  $\mu$ PIV- Messungen im Mikro-Kanal gezeigt werden (Brede 2008; Melskotte 2010 & 2012). Hierbei wird durch die Luftschicht am Objekt auch die Kontaktfläche zwischen Wasser und Objekt verändert; die Kontaktfläche nimmt drastisch ab und somit verringert sich auch die Reibung. Eine Anwendung dieses Prinzips ist bei großen Schiffen denkbar, deren Rumpfflächen unter Wasser mehrere Hektar ausmachen.

Die Beschreibung dieser Grenzfläche soll anschließend durch geeignete numerische Simulationen mit Ansys CFX 12 erfolgen. Dabei gilt es zunächst zu klären, wie die Ausbildung einer solchen Wasser-Luft Grenzfläche mit angepassten Randbedingungen beschrieben werden kann und wie die Ausbildung einer solchen Oberfläche erfolgt. Zukünftige Schritte werden sein, die Eigenschaften der unter Grenzfläche mit darüber strömendem Wasser, wie es in einem Versuchskanal auftritt, zu simulieren.

## Approximierte Oberflächengeometrie und - chemie

Die bei Salvinien in der Natur auftretenden Strukturen werden zunächst durch einfache zylindrische Säulen mit abgerundetem Kopf approximiert. Diese Säulen werden mit einem Durchmesser von  $100\ \mu\text{m}$  und einer Höhe von  $1\ \text{mm}$  konstruiert; die Abstände der Säulen werden variiert. In der dichtesten Anordnung stehen sie in einem äquidistanten, quadratischen Raster mit einem Achsabstand von  $200\ \mu\text{m}$  in X- und Y-Richtung zueinander. Zwischen den Säulen ergibt sich daraus diagonal ein maximaler Abstand von rund  $183\ \mu\text{m}$ . Weitere Anordnungen werden mit einem Achsabstand in Hauptkoordinatenrichtung von  $300\ \mu\text{m}$ , bzw.  $400\ \mu\text{m}$  aufgebaut. Es ergeben sich zwischen den Säulen somit maximale Abstände von  $324\ \mu\text{m}$  bzw.  $466\ \mu\text{m}$ .

Das Oberflächenverhalten, also die Oberflächenchemie der Säulen, wird bei der Simulation über den Kontaktwinkel zwischen Wasser und Oberfläche vorgegeben. Die Oberflächen werden glatt und unstrukturiert approximiert. Die Widergabe von Nanostrukturen kann durch Vorgabe des Kontaktwinkels entfallen. Als Eigenschaft wird der halbkugelförmigen Spitze eine hydrophile Oberfläche, dem zylindrischen Teil der Säule eine superhydrophobe Oberfläche zugewiesen.

Ziel der Simulation ist es, Aussagen über den Einfluss des Abstandes  $w$  der Säulen und der Höhe  $h$  der Vertikalstrukturen auf Ausbildung der Luftschicht bei superhydrophoben, Luft haltenden Oberflächen zu treffen. Zudem soll der Einfluss der in der Natur beobachteten hydrophilen Strukturspitzen auf die Stabilität der Wasser-Luft Grenzfläche untersucht werden.

Angesichts der erforderlichen hohen räumlichen Auflösung ist die maßstabsgerechte numerische Untersuchung einer in dieser Weise mikrostrukturierten Oberfläche von mehreren Quadratdezimetern oder gar Quadratmetern Größe mit einer genauen Abbildung einer Wasser- Luft-Grenzfläche, auch mit der heute zu Verfügung stehenden Rechentechnik, nicht realisierbar. Daher wird das zu berechnende Modell unter Ausnutzung von Symmetrien auf einen kleinen Ausschnitt der Oberfläche reduziert. Der Einfluss der Schnittflächen auf das abgebildete Teilgebiet wird über geeignete Rand- und Anfangsbedingungen modelliert. Zusammengefasst reduziert sich das Rechengebiet schließlich auf einen rechteckigen Ausschnitt mit einem Längen- zu Breitenverhältnis von zwei zu eins. In der Höhe umfasst das vernetzte Volumen den Bereich von der Körperoberfläche bis etwa  $0,5\text{mm}$  über die Spitzen der Struktur (Abb. 3 rechts).

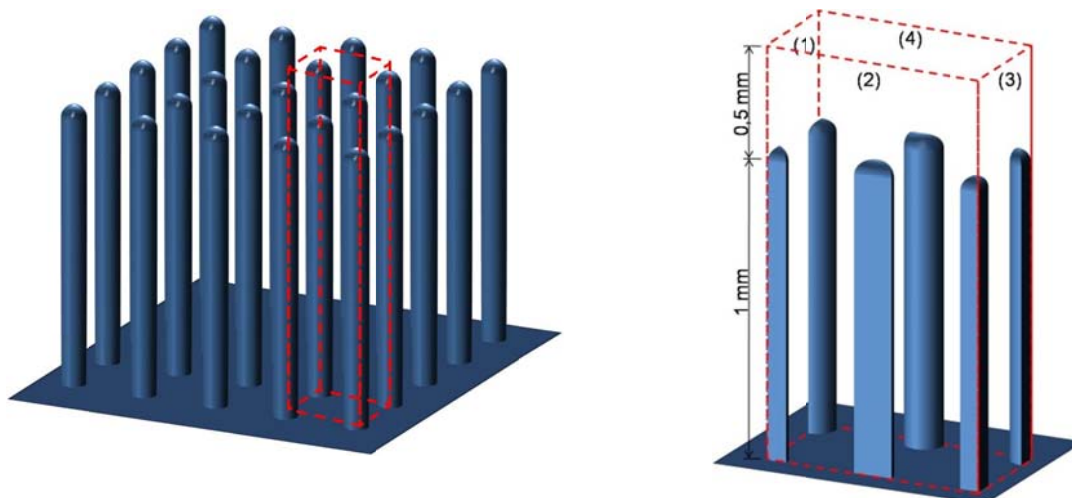
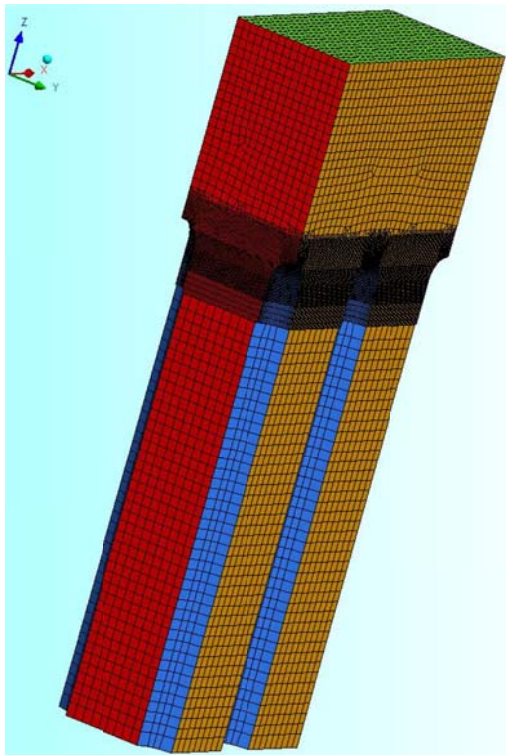


Abb. 3: Rechengebiet (rechts) als Ausschnitt aus einer Oberflächenstruktur (links)

## Netzparameter

Entsprechend den Eigenheiten der Finite-Volumen-Methode wird ein Simulationsergebnis fehlerärmer, je feiner die räumliche und zeitliche Auflösung der Simulation des physikalischen Problems sind. Gleichzeitig steigen jedoch mit zunehmend feiner Auflösung die Ansprüche der Rechnung bezüglich Arbeitsspeicher und Rechenleistung der Maschine, der Zeitaufwand pro Rechnung wird größer. Da aus diesem Grund eine hochfeine Auflösung des gesamten Rechengebietes nicht praktikabel ist, wird eine lokale Anpassung des



**Abb. 4: Beispielhaftes Netz zur Berechnung mit lokaler Knotenverdichtung zur verbesserten Abbildung der Wasser-Luft Grenzfläche**

### Fluidmodell

In der Simulation werden die Stoffmodelle für flüssiges Wasser und gasförmige Luft bei 25 °C aus der Ansys CFX-Stoffbibliothek verwendet. Für die Berechnung der Wasser-Luft Grenzfläche wird ein Oberflächenspannungskoeffizient bei Wasser von 74,5 N/mm verwendet. Bei Superhydrophobie wird der Kontaktwinkel zwischen Wasser und fester Oberfläche im Bereich größer als 150° bis hin zu 160° angegeben. Um eine deutlich superhydrophobe Oberfläche zu definieren wird ein Kontaktwinkel von 160° vorgegeben. An den hydrophilen Spitzen der Strukturen wird ein Kontaktwinkel von 45° zwischen Wasser und Luft festgelegt. Diffusionsvorgänge zwischen den Phasen sind nicht vorgesehen. Die Berechnung der Wasser-Luft Grenzfläche erfolgt auf Basis des inhomogenen Mehrkomponentenmodells, bei dem jede Komponente eine separate Berechnung durchläuft. Als Folge erhält man schärfere Abbildungen der Grenzfläche. Die Simulation wird ohne Turbulenzmodell als eine Berechnung laminarer Strömung durchgeführt.

## Lastfälle

Zur Untersuchung des Geometrieinflusses auf die dynamische Ausbildung der Wasser-Luft Grenzfläche wird für jede Strukturvariation in einer statischen Umgebung die Ausbildung der Wasser-Luft Grenzfläche zwischen den Vertikalstrukturen berechnet. Hierbei lassen sich schnell globale Parameter für die Simulation, wie die Zeitschrittweite und die Koeffizienten des Mehrkomponentenmodells, testen. In der statischen Berechnung wird an allen freien Rändern des Rechengebietes eine Symmetrierandbedingung gesetzt. Ausnahmen dazu sind die Oberseite und der Boden. Die Symmetrie verbietet den Transport von Masse, Impuls und Feldgrößen normal zur Oberfläche. Die Oberseite des Rechengebietes bildet eine Öffnung mit einem statischen Überdruck von 5 Pa, durch die Wasser nachfließen und Luft und Wasser entweichen kann. Damit trägt die Oberfläche eine Wasserschicht von insgesamt etwa einem Millimeter Höhe. Die Benetzungseigenschaften der Wände werden über den Kontaktwinkel zwischen Wasser und Wand eingestellt. Die Wasser-Luft Grenzfläche liegt im Bereich der Strukturspitzen, etwa 10  $\mu\text{m}$  oberhalb des Übergangs zum Mantel der Struktur. Gefordert wird hier eine möglichst scharfe Abbildung der Wasser- Luft-Grenzfläche. An der Unterseite des Rechengebietes wird sowohl mit einer Wand als auch mit einer Öffnung bei Umgebungsdruck gerechnet. Da beides zu vergleichbaren Ergebnissen führte, wird letztendlich auf die numerisch stabilere Randbedingung einer Wand zurückgegriffen.

## Zeitschrittweite und Konvergenz

Die richtige Wahl der Zeitschrittweite ist besonders in Mehrkomponentenrechnungen von großer Bedeutung. Die Praxis hat gezeigt, dass in den vorliegenden stark auftriebs- und oberflächenspannungsgetriebenen Simulationen die automatisch berechnete Zeitschrittweite zu niedrig ausgefallen ist. Die durch Wechselwirkung von Auftriebs- und Oberflächenkräften hervorgerufenen lokalen Fluidgeschwindigkeiten sind so groß, dass bei der vom Programm vorgeschlagenen zeitlichen Auflösung von 0,01 s bis 0,001 s pro Zeitschritt zu zu großen virtuellen Geschwindigkeiten zwischen den Simulationsiterationen führen.

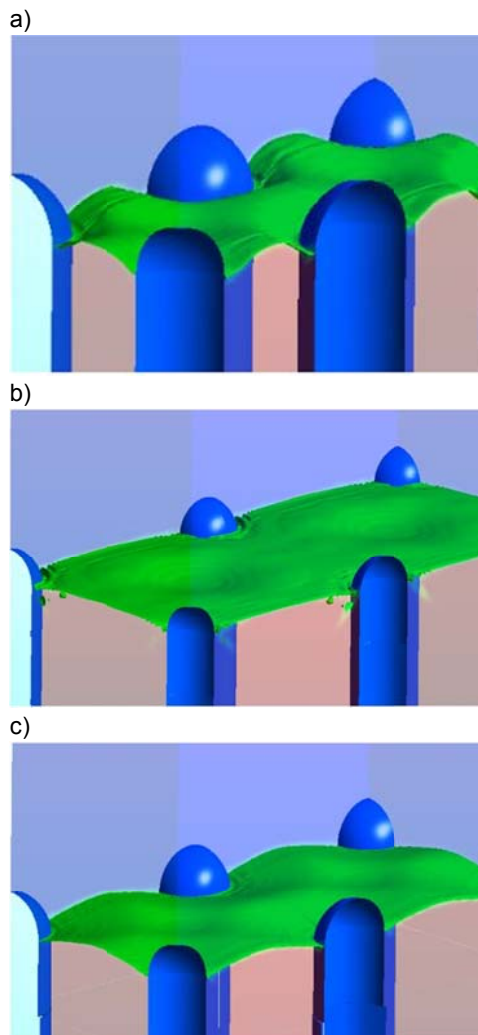
Um eine stabile Berechnung zu erreichen, wird eine Zeitschrittweite von kleiner als  $10^{-6}$  s als geeignet erachtet. Die Berechnung erfolgt in zwei Abschnitten: Zunächst werden bei einer Zeitschrittweite von  $10^{-7}$  s die Volumenanteile von Wasser und Luft im Volumenelement berechnet. Anschließend erfolgte eine weitere Rechnung, die ca. 20 Iterationen umfasst, in der mit einer Zeitschrittweite von  $10^{-10}$  s die Wasser- Luft-Grenzfläche auskonvergiert.

Konvergenz im Sinne einer möglichst verschwindenden Fehlergröße ist laut Ansys CFX Theory Guide in Mehrphasenrechnungen mit Oberflächenspannung und Auftrieb leider kaum möglich, da in den Phasengrenzen aufgrund der gemischten Volumina stets große Residuen zurückbleiben. Lediglich eine globale Fehlerbewertung anhand des Ergebnisses ist hier möglich.

## Ergebnis

Die Form der sich zwischen den Strukturen mit hydrophilen Spitzen ergebenden Grenzflächen entspricht zunächst nicht der Erwartung, dass sich eine einfach gekrümmte Wasser-Luft Grenzfläche an der Spitze der Strukturen ausbildet (vgl. Abb. 1). Durch die Vorgabe von Kontaktwinkeln an der Struktur befindet sich die Luft-Wasser Grenzfläche am Übergang der hydrophilen Spitze zur superhydrophoben, zylindrischen Säulenoberfläche. Der sich dann ausbildenden Wasser-Luft Grenzfläche wird hier bereits ein Krümmungswinkel vorgegeben. Die sich gleichzeitig zwischen den Strukturen ausbildende Grenzfläche muss diesem zunächst folgen und beginnt anschließend, sich unter dem Auftrieb der von unten wirkenden Luft nach oben zu wölben.





**Abb. 5: Ausbildung der Wasser-Luft Grenzfläche bei einem Säulenabstand von a) 200  $\mu\text{m}$ , b) 300  $\mu\text{m}$  und c) 400  $\mu\text{m}$**

Innerhalb dieses Prozesses entstehen durch die Vorgabe am Rand anscheinend Mehrfachkrümmungen der Oberfläche. Die Wasser-Luft Grenzfläche dringt in diesem Fall wesentlich tiefer in die Struktur ein als im Vergleichsfall komplett hydrophober Strukturen.

Die Ausprägung der Krümmung wird dabei eindeutig vom Strukturabstand beeinflusst. Während bei einem Strukturabstand von 200  $\mu\text{m}$  eine starke Krümmung der Oberfläche, besonders im Bereich diagonal zwischen den Strukturen zu beobachten ist (Abb. 5 a)), nimmt diese bei einem Strukturabstand von 400  $\mu\text{m}$  deutlich ab (Abb. 5 c)).

Um den Einfluss des Kontaktwinkels auf die Ausbildung der Wasser-Luft Grenzfläche weiter zu untersuchen, bietet es sich an, die Abmaße der Strukturspitze zu verkleinern. Dadurch lässt sich möglicherweise ein Effekt wie bei der Vergrößerung des Säulenabstandes erreichen, was sich positiv auf das Krümmungsverhalten der Grenzfläche auswirkt.

Eine erste Simulation zur Ausbildung von Wasser-Luft Grenzflächen unter Berücksichtigung verschiedener Kontaktwinkel und somit auch verschiedener Oberflächenchemien kann somit als gelungen angesehen werden. Im Folgenden ist zu klären, wie sich die Grenzflächenausbildung bei Strömung des Wassers verhält.

### Danksagung

Wir danken dem Bundesministerium für Bildung und Forschung für die finanzielle Förderung des Projektes im Rahmen des BIONA Forschungsprogramms.

### 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  $\mu\text{PIV}$ -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.