

LUFT HALTENDE OBERFLÄCHEN ZUR REIBUNGSREDUKTION - KÜNSTLICHE OBERFLÄCHEN UND IHRE BIOLOGISCHEN VORBILDER

AIR RETAINING SURFACES FOR DRAG REDUCTION – ARTIFICIAL SURFACES AND THEIR BIOLOGICAL EXAMPLES

Jan-Erik Melskotte, Martin Brede, Wibke Wriggers, Matthias Mayser¹, 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

Ein Großteil der Betriebskosten in der Seeschifffahrt entfallen auf Brennstoff zum Antrieb des Schiffs. Neben dem durch die Form des Schiffes gegebenen Widerstand gilt es beim Vortrieb hauptsächlich die Reibung des Wassers am Schiffsrumpf zu überwinden. Biologische Systeme wie der Wasserfarn *Salvinia* oder der Rückenschwimmer *Notonecta glauca* zeigen an ihren Oberflächen außergewöhnliche Effekte, die Vorbild für die Reibungsreduktion am Schiff sein können. Sowohl *Salvinia*, als auch *Notonecta glauca* verfügen über superhydrophobe Luft haltende Oberflächen, die den Wasserkörper mit einem Luftfilm abgrenzen und so eine Benetzung des Objekts verhindern. Eine Übertragung des Wirkprinzips auf eine künstlich hergestellte Oberfläche stellt einen vielversprechenden Ansatz zur Reibungsverminderung am Schiffsrumpf dar. Die Strömungseigenschaften an den Deckflügeln des *Notonecta glauca* wurden mit dem in den vergangenen Jahren an der Universität Rostock verwendeten μ PIV-System (Brede et al. 2006, 2008) ermittelt. Erste Ergebnisse für die Deckflügel des *Notonecta glauca* zeigen eine hohe Wandgeschwindigkeit in der Nähe der Grenzfläche zwischen der Wasserphase und der gehaltenen Luftschicht, ähnlich wie bei biologischen Oberflächen vom Wasserfarn *Salvinia* (Brede et al. 2009).

Einleitung

In der Natur treten bei verschiedenen Arten von Tieren und Pflanzen superhydrophobe Oberflächen auf. Diese Oberflächen sind durch das Zusammenwirken von Mikro- und Nanostrukturen und einer hydrophoben Oberflächenchemie gekennzeichnet. Durch diese besondere Beschaffenheit zeigen diese Oberflächen erstaunliche Eigenschaften und besitzen ein großes Potential, technisch adaptiert und wirtschaftlich genutzt zu werden. Dazu ist als Beispiel die Lotus-Pflanze mit ihrem Mechanismus zur Selbstreinigung zu nennen (Barthlott, 1997), die technisch adaptiert wurde und deren Wirkprinzip als Lotus-Effect® marktauglich ist.

Neben dem Effekt der Selbstreinigung bei superhydrophoben Oberflächen ist als weitere Besonderheit, die Lufthaltefähigkeit der unter Wasser getauchten Oberfläche zu nennen. Der

Nutzen dieser Oberflächen wird in vielen Fällen der Aufrechterhaltung des Gasaustauschs und somit der Aufrechterhaltung der Atmung der Pflanze oder des Tieres zugesprochen (Raven 2008, Thorpe 1949). Technisch betrachtet stellt der Luftfilm an der Oberfläche jedoch eine Möglichkeit dar, das Gleiten eines Körpers durch das Wasser zu ermöglichen. Hierbei wird durch die Luftschicht am Objekt auch der 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 100.000 Quadratmeter ausmachen. Eine weitere Möglichkeit wäre der Einsatz in Pipelines zur Reduktion des Druckverlustes beim Transport von Flüssigkeiten, da hier durch die Wandhaftung des Fluides große Verluste auftreten. Zentraler Aspekt bei diesen speziellen Oberflächen ist die Lufthaltedauer, auch unter Strömungsbelastung. Ein Beispiel für das Wirken von Mikro- und Nanostrukturen zur Lufthaltung ist bei der Oberfläche des Schwimmfarns *Salvinia* bekannt. Die Mikro-Strukturen sind hierbei je nach *Salvinia*-Art in einem Größenbereich von einigen hundert Mikrometern bis zu einigen Millimetern vorzufinden; Epikutikuläre bilden auf der Oberfläche der Pflanzen eine Nanostrukturierung. Der *Salvinia*-Farn ist neben seiner superhydrophoben Eigenschaft in der Lage unter Wasser eine feine Luftschicht zwischen diesen Strukturen zu halten. Dabei sind die hydrophoben Eigenschaften der Strukturen sowohl durch ihre Formgebung als auch durch ihren Wachsüberzug bedingt. Es wird somit verhindert, dass Wasser zwischen die Vertikalstrukturen dringen kann. Wie die Untersuchungen am Nees-Institut, Bonn, Center for Functional Nanostructures, Karlsruhe, Institut für Biologie und Nanobiotechnologie, Kleve und dem Lehrstuhl Strömungsmechanik, Rostock hinsichtlich der Eigenschaften der Wachskristalle haben zeigen können, bestehen jedoch auch hydrophile Bereiche an den Strukturspitzen der *Salvinia molesta* („*Salvinia*-Effekt“, Barthlott et al. 2010).

Während sich bei den verschiedenen *Salvinia*-Arten Strukturen im Größenbereich von bis zu mehreren Millimeter finden lassen, liegen die Strukturgrößen der Wasserwanze *Notonecta glauca* (Abb. 1), die ebenfalls Luft an einigen Bereichen ihrer Oberfläche halten kann, deutlich darunter. Wie bei Ditsche-Kuru et al. 2011 beschrieben, liegen bei *Notonecta glauca* an verschiedenen Körperregionen auch unterschiedliche Oberflächenstrukturen vor. Insbesondere sind die Deckflügel (lat. Elytren) der Wasserwanze hervorzuheben. Sie sind ebenfalls durch eine Doppelstruktur gekennzeichnet, die jedoch in diesem Fall aus zwei



Abb. 1: *Notonecta glauca* unter der Wasseroberfläche

unterschiedlich hohen Haarstrukturen besteht und keine Wachse wie bei den Pflanzen enthält. Dem Vorbild *Salvinia* bzw. *Notonecta glauca* folgend, eine Luftschicht direkt an einer Oberfläche, auch unter Strömungsbelastung, halten zu können, birgt bei der Entwicklung künstlicher funktionaler Oberflächen für getauchte Körper die Möglichkeit, den Reibungswiderstand und somit auch den Bedarf an Antriebsenergie zu reduzieren.

Messsystem

Die Messungen werden in einem speziell gefertigten Mikrokanal durchgeführt (Abb. 2). Dieser Kanal ist durch eine besonders turbulenzarme Strömung gekennzeichnet und 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. Bei Bedarf ist die der Probe gegenüber liegende Kanalwand durch eine Variante aus Plexiglas ersetzbar, um beispielsweise das Verhalten der Luftschicht in der Draufsicht beobachten zu können.

Für die Geschwindigkeitsmessungen wird ein Mikro-PIV-Messsystem besteht aus einer Dantec Hi-Sense PIV-Kamera mit 1280 x 1024 Pixel Auflösung, die auf einem Zeiss Stemi 11 Mikroskop montiert ist, eingesetzt. Dieses Mikro-PIV-System des Lehrstuhls Strömungsmechanik der Universität Rostock ist bereits bei Brede et al. 2006 vorgestellt und verfügt über ein Leica planapo 2x Objektiv mit einem Objektabstand von 15 mm, um einen möglichst großen Arbeitsabstand zu realisieren. Polyamidpartikel werden als Streuteilchen verwendet, die im Durchlichtverfahren von einer gepulsten Lichtquelle beleuchtet werden. Die CCD-Kamera erzeugt ein Doppelbild des Streuteilchenbildes. Das Doppelbild wird gemäß der konventionellen PIV-Technik kreuzkorreliert. 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.

Neben den Geschwindigkeitsmessungen werden auch Untersuchungen zum Verhalten der Luftschicht am Deckflügel der *Notonecta glauca* bei verschiedenen Anströmgeschwindigkeiten durchgeführt. Hierzu wird wie beschrieben die der Probe gegenüber liegende Seitenwand des Kanals durch eine Seitenwand aus Plexiglas ersetzt, die eine Draufsicht auf die Probe und Kaltlichtbeleuchtung ermöglicht. Die Ausbreitung der Luftschicht an der

Oberfläche wird mittels einer digitalen Spiegelreflexkamera aufgenommen und anschließend am PC ausgewertet.

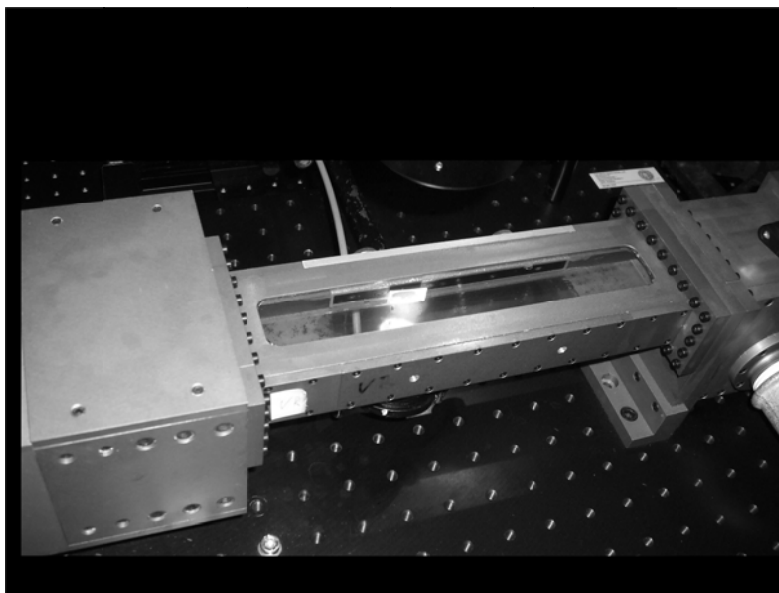


Abb. 2: : Mikrokanal am LSM,
mit eingesetzter Probe im Durchlichtverfahren

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.

Oberflächenmaterialien

Bei der Überströmung einer Luft haltenden Oberfläche lässt sich die prinzipielle Funktionsweise anschaulich am Beispiel einer einfachen Haarstruktur erklären, die vollständig unter Wasser getaucht, eine Luftschicht hält. In Abb. 3 ist schematisch der Aufbau einer solchen Oberfläche dargestellt, welche im Bereich zwischen den Strukturen Luft aufweist und bei der sich direkt an bzw. oberhalb der Strukturspitzen Wasser befindet. Diese Wasser-Struktur- bzw. Wasser-Luft-Grenzfläche weist zwei Randbedingungen auf. 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. Eine Verringerung der Haftreibung ist durch die Luftschicht zwischen der eigentlichen Oberfläche und dem Wasser somit zu erwarten. Wie bereits angedeutet ist eine technische Umsetzung dieses Prinzips besonders für den Schiffbau von großem Interesse, da hier ein besonders großes Einsparpotential bei der Antriebsleistung durch eine Beeinflussung der Haftbedingung am Rumpf angestrebt werden kann.

Wie einleitend beschrieben, lässt sich das Phänomen der Lufthaltung unter Wasser beim Schwimmpfarn *Salvinia* besonders gut beobachten (Brede et al. 2009). Um die Luft-Wasser Grenzfläche, deren Kontur der eines Zirkuszelts ähnelt, zwischen den Strukturen stabilisieren zu können, ist eine punktuelle Benetzung mit Wasser an diesen Stellen von der Natur vorgesehen (Barthlott et al. 2010).

Ein anderes Wirkprinzip scheint bei den Elytren des *Notonecta glauca* vorzuliegen. Hier sind die Strukturen einerseits wesentlich kleiner als bei der *Salvinia*, andererseits sind Insekten nicht in der Lage, Wachskristalle als Nanostrukturierung auszubilden. Unter dem Rasterelektronenmikroskop lassen sich deutlich die Strukturen auf den Elytren unterscheiden: Einerseits sind die so genannten Setae, die die Mikro-Struktur darstellen, zu erkennen. Sie besitzen eine durchschnittliche Länge von $90\ \mu\text{m}$, sind gekrümmt und erreichen somit Höhen von rund $40\ \mu\text{m}$ oberhalb der Deckflügeloberfläche (Abb. 4 a)).

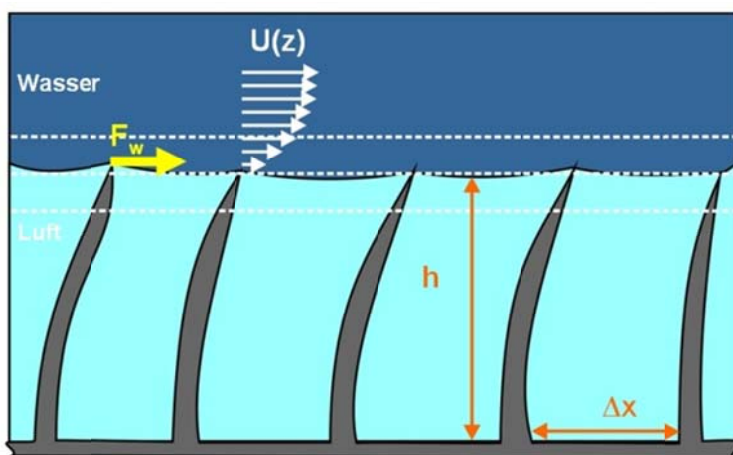


Abb. 3: : Schematische Darstellung des Geschwindigkeitsverlaufes an einer lufthaltenden Oberfläche

wesentlich feinere Haarstrukturen, Microtricha (Abb. 4 b)), die aufrecht stehend bei einer Länge von gut $1\ \mu\text{m}$ in einer enormen Dichte von rund $5,8 \cdot 10^6/\text{mm}^2$ vorkommen (Ditsche-Kuru et al. 2011).

Die Befestigung der Elytren auf den Trägerelementen erfolgt mit einer dauerelastischen Klebmasse, die die Eigenschaften des Wassers hinsichtlich der Oberflächenspannung nicht beeinflusst und die Probenoberfläche nicht verklebt, bzw. beschädigt.

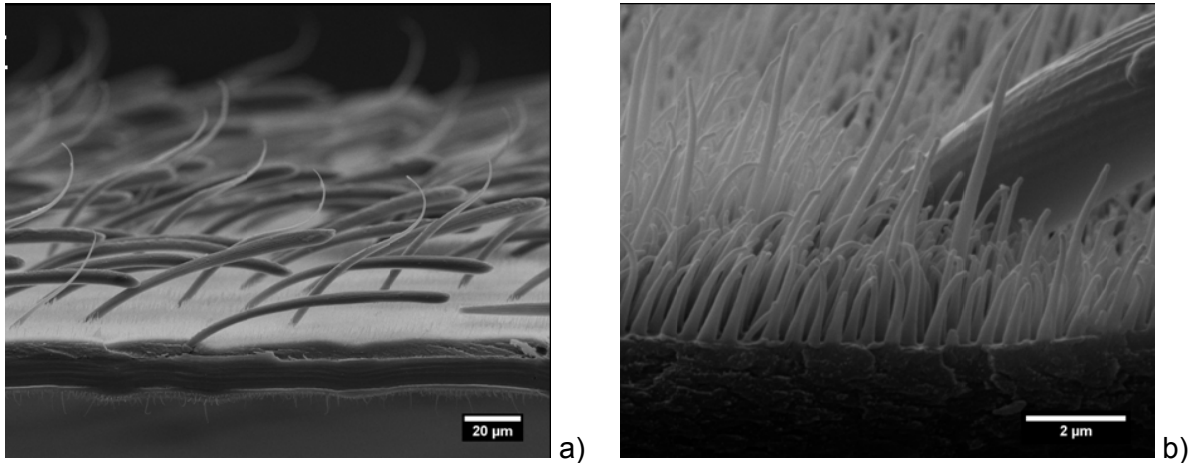


Abb. 4: *Notonecta glauca* Deckflügel; a) Setae und b) Microtricha nach Ditsche-Kuru et al. 2011

Ergebnisse

In dem oben beschriebenen Versuchskanal erfolgen die hydrodynamischen Messungen an den Elytren der *Notonecta glauca*. Die Auswertung erfolgt über zeitgemittelte Geschwindigkeitsprofile an einer Stelle des Geschwindigkeitsfelds normal zur Oberfläche der Elytre. Dazu wird zunächst eine Strömungsgeschwindigkeit von rund 0,5 m/s tangential zur Oberfläche eingestellt, anschließend werden gemäß der PIV-Methode Doppelbilder aufgenommen und ausgewertet. Eine Abschätzung der Grenzschichtdicken- und Grenzschichtgeschwindigkeitenentwicklung nach Schlichting 1997 konnte zeigen, dass sich am Schiff diese geringen Geschwindigkeiten in Rumpfnähe im Bereich der viskosen Unterschicht einstellen und somit der Geschwindigkeitsbereich als bereits praxisrelevant zu erachten ist.

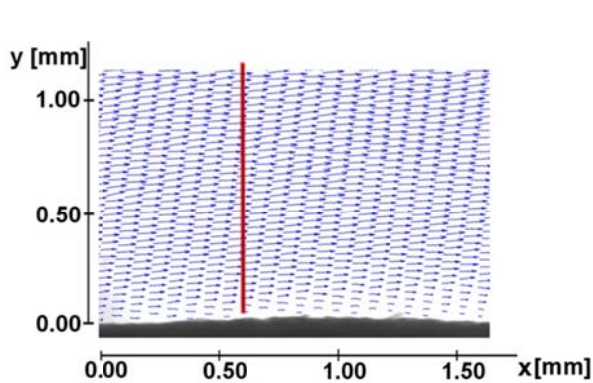


Abb. 5: Instantanes, mit μ PIV ermitteltes Geschwindigkeitsfeld über der Elytre von *Notonecta glauca*

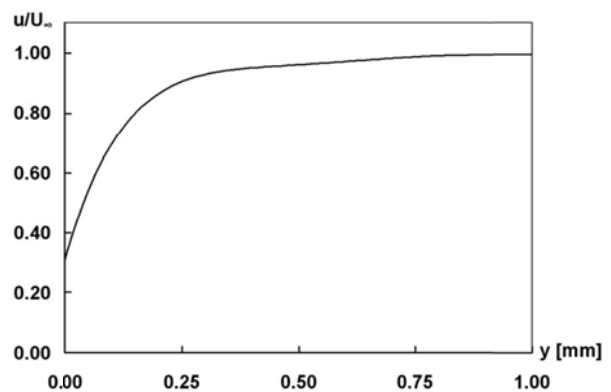


Abb. 6: Über die Anströmgeschwindigkeit normierter Geschwindigkeitsverlauf normal zur Elytrenoberfläche

Es zeigt sich bei der Elytrenoberfläche, dass die Geschwindigkeitsbeträge an der Wasser-Luft-Grenzfläche etwa 35% 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 im Vergleich zum Fall eines wandhaftenden Fluides an der Grenzfläche verringert sind.

Betrachtet man abschließend die Lufthalteeigenschaften der Elytren des *Notonecta glauca*, so lässt sich bereits im hydrostatischen Zustand eine vollkommen mit Luft bedeckte Oberfläche feststellen. Hydrostatisch belastet verringert sich die mit Luft bedeckte Fläche über einen Zeitraum von gut fünf Wochen lediglich um bis zu 20 %. Somit liegen auch beim *Notonecta glauca* sehr gute Lufthaltemechanismen für den hydrostatischen Fall vor. Ähnliches kann auch für den hydrodynamischen Fall festgestellt werden. Hierzu wird die Anströmgeschwindigkeit im Kanal schrittweise auf bis zu 5 m/s, der maximalen Kanalgeschwindigkeit erhöht. Die Veränderung der mit Luft bedeckten Fläche wird wie oben beschrieben photographisch festgehalten und anschließend ausgewertet. Die Mittelung aus drei Versuchen mit unterschiedlichen Elytren ergab, dass bis zu einer Geschwindigkeit von 2,75 m/s noch knapp 80 % der ursprünglich mit Luft bedeckten Fläche erhalten sind. Bei weiter steigender Geschwindigkeit verringert sich die mit Luft bedeckte Fläche zwar weiter, jedoch bleiben bei 5 m/s noch immer gut 40 % der Oberfläche luftbedeckt (Abb. 7). Die Elytren des *Notonecta glauca* verfügen somit nicht nur über eine Oberfläche, die sehr hohe Wandgeschwindigkeiten an der Luft-Wasser-Grenzfläche ermöglicht, sondern auch bei hydrodynamischer Belastung hohen Anströmgeschwindigkeiten standhält.

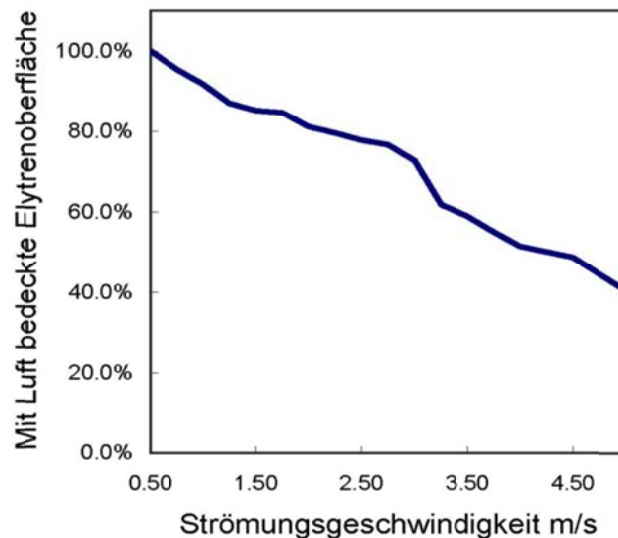


Abb. 7: Lufthaltevermögen der Elytren von *Notonecta glauca* unter Strömung, Mittelwert dreier Elytren

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, Th.; Leder, A.; Barthlott, W., 2009: „Biomimetische superhydrophobe Luft haltende Oberflächen zur technischen Anwendung“ in: A. Delgado, C. Rauh, H. Lienhart, B. Ruck, A. Leder, D. Dopheide (Hrsg.) „Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik“ - 17. Fachtagung der GALA e.V. 2009, Universität Erlangen, 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.; 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
- Ditsche-Kuru, P.; Schneider, E. S.; Melskotte, J.-E.; Brede, M.; Leder, A.; Barthlott, W., 2011: "Superhydrophobic surfaces of the water bug *Notonecta glauca*: a model for friction reduction and air retention", *Beilstein J. Nanotechnol.* 2011, 2, 137-144
- Raven, J.A., 2008: Not drowning but photosynthesizing: probing plant plastrons. *New Phytol.* 177 , 841-845
- Thorpe, W.H. and Crisp, D.J., 1949: „Studies on plastron respiration. IV. Plastron respiration in the coleopteran“. *J. Exp. Biol.* 26 , 219-261
- Schlichting, H. & Gersten, K., 1997: *Grenzschichttheorie*. Springer Verlag Berlin 1997