

Einfluss der Strömungsgeschwindigkeit auf die Stabilität von Luft-Wasser Grenzflächen an biomimetischen, Luft haltenden Beschichtungen

Influence of the flow velocity on the stability of air-water interfaces on biomimetic air retaining surfaces

W. Baumgarten¹, B. Böhnlein², A. Wolter¹, M. Brede¹, W. Barthlott², A. Leder¹

¹Universität Rostock, Lehrstuhl Strömungsmechanik, Albert-Einstein-Str. 2, 18059 Rostock

²Universität Bonn, Nees Institut für Biodiversität der Pflanzen, Venusbergweg 22, 53115 Bonn

Reibungsreduktion, Luft-Wasser, funktionale Oberflächen, Biomimetik
drag reduction, air-water, functional interfaces, biomimetics

Zusammenfassung

Damit sich Schiffe durch Wasser bewegen, müssen sie die Reibung zwischen Wasser und Schiffsrumpf überwinden. Durch das Aufbringen von Luft haltenden Beschichtungen auf den Schiffsrumpf lässt sich diese Reibung reduzieren, wodurch die Treibstoffkosten für den Antrieb des Schiffes reduziert werden. Die Stabilität dieser Luftschicht muss unter den verschiedenen am Schiff auftretenden Einsatzbedingungen gewährleistet sein. Der vorliegende Beitrag untersucht dabei exemplarisch den Aspekt der Stabilität der Luftschicht in Abhängigkeit von der Anströmgeschwindigkeit, wobei hier eine hydrophobe Beschichtung als Grundlage verwendet wird. Bei den untersuchten Proben handelt es sich um von unseren Partnern im Nees Institut der Universität Bonn entwickelte und hydrophob beschichtete Mikrosäulenproben. Es zeigte sich, dass die Mikrosäulen Luft bei Anströmungen von bis zu 2 m/s halten können.

Einleitung

Bei einer Bewegung die Reibung zu reduzieren, bedeutet Energie einzusparen. Dies ist für viele Organismen in der Natur von Bedeutung, da sie auf diese Weise weniger Energie für die Bewegung verbrauchen. Auch Schiffe, die durch das Wasser fahren, müssen zur Bewegung die Reibung zwischen Wasser und Schiffsrumpf überwinden. Die Reduktion dieser Reibung, beispielsweise durch eine Luftschicht am Schiffsrumpf, führt zu einer deutlichen Kostenersparnis. Aus diesem Grund wird vermehrt auf dem Gebiet der Reibungsreduktion geforscht. Sowohl aus der Pflanzen- als auch der Tierwelt sind Beispiele bekannt, in denen Reibung unter Wasser vermindert wird, oder Effekte der Lufthaltung ausgenutzt werden. Der Schwimmpflanz *Salvinia* bildet beispielsweise eine permanent Luft haltende Schicht an der Oberseite seines Blattes aus. Die Oberfläche des Blattes ist dabei dicht mit Mikrostrukturen besetzt, die je nach *Salvinia*-Art eine Größe zwischen wenigen Mikrometern und einigen Millimetern besitzen. Diese feinen Härchen sind mit winzigen hydrophoben Wachskristallen bedeckt und haben eine hydrophile Strukturspitze. Aufgrund dieser Eigenschaften kann dieser

Schwimmfarn Luft unter Wasser halten („Salvinia-Effekt“, Barthlott et al. 2010, Mayser et al. 2014). Der Nutzen dieser Eigenschaft besteht für die Pflanze darin, die Atmung und den Gasaustausch unter Wasser aufrechtzuerhalten (Raven 2008, Thorpe und Crisp 1949). In der Tierwelt ist der Rückenschwimmer *Notonecta* dafür bekannt, eine Luftschicht unter Wasser halten zu können. Diese Luftschicht bildet sich dabei an verschiedenen Körperregionen, insbesondere den Flügeln dieses Lebewesens aus, wo die Strukturen der Härchen deutlich kleiner und völlig anders angeordnet sind als die von *Salvinia* (Ditsche-Kuru et al. 2011). Es ist sowohl für die Pflanzen, als auch für die Tiere wichtig, dass diese Luftschichten auch unter Strömungsbelastung erhalten bleiben, damit der Reibungsreduktionseffekt nicht verloren geht. *Notonecta glauca* erzeugt Luftschichten, die Strömungsbelastungen von bis zu über 5 m/s aushalten (Melskotte et al. 2011). In der vorliegenden Arbeit werden funktionalisierte künstliche mikrostrukturierte Oberflächen hinsichtlich ihrer Strömungsstabilität analysiert. Zunächst wird dabei ein Überblick über das vorhandene Material und die Mess- und Auswertungsmethodik gegeben. Danach werden die Ergebnisse der Versuche präsentiert und im letzten Teil dieses Artikels diskutiert.

Versuchsaufbau, Probenmaterial und Auswertungsmethoden

Es wurden für die Untersuchung der Stabilität von Luftschichten vollständig hydrophobe Mikrosäulenproben verwendet, die mit einer kreisförmig abgerundeten Anströmkante versehen waren (Abb. 1).

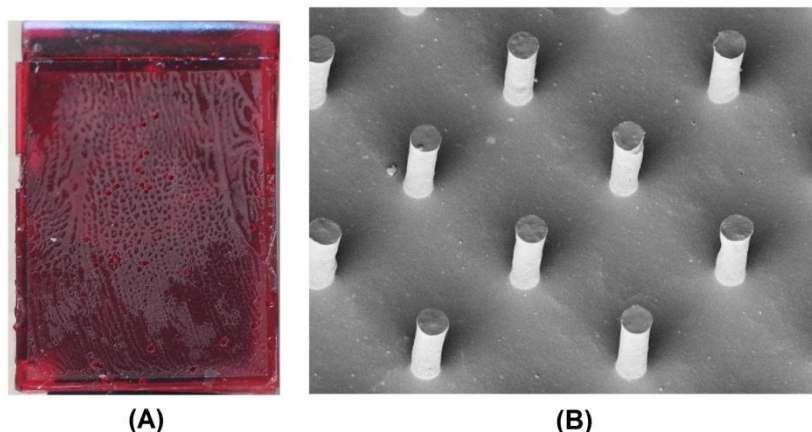


Abbildung 1: (A) Mikrosäulenprobe. (B) REM-Aufnahme der Mikrosäulenprobe.

Die Untersuchung der Proben erfolgte am Kavitationskanal (K21, welcher im Rahmen dieser Tagungsreihe bereits vorgestellt wurde (Kröger et al. 2012)). Die Messstrecke des K21 verfügt über einen Querschnitt von 300 mm x 300 mm und eine Länge von 1300 mm, sie ist über großflächige Fenster (je 1100 mm x 200 mm) allseitig optisch gut zugänglich.

Der K21 kann mit Systemdrücken zwischen 0,4 und 2,0 bar und Anströmgeschwindigkeiten zwischen 0,05 und 10,0 m/s betrieben werden. Der Turbulenzgrad in der Messstrecke beträgt ca. 3%. Befestigt wurden die Proben auf einem stromlinienförmigen Probenhalter, der von oben in die Messstrecke des Kavitationstanks eingebracht wurde. Der hydrostatische Druck in der Messstrecke lag bei 0,04 bar. Die Luft haltende Seite der Säulenstruktur zeigte in Richtung der Gravitationskraft, d.h. die Einbaulage entsprach hier der Schiffsunterseite. Die Experimente wurden folgendermaßen durchgeführt:

Vor jedem Experiment wurde die zu untersuchende Probe vollständig getrocknet. Danach wurde sie in den Kavitationstank eingeführt und befand sich zwei Minuten unter Wasser, bis die Geschwindigkeit der Strömung in der Messstrecke linear, innerhalb von weniger als 10 s, auf den gewünschten Wert erhöht wurde und danach konstant blieb. Es folgte alle 10 s eine fotografische Aufnahme der reflektierenden Luftschicht, wobei die Totalreflektion der Luft-

Wasser Grenzfläche ausgenutzt wurde. Für die Fotoaufnahmen fand eine Digital-Kamera (Nikon D7100) mit einem Makroobjektiv (AF-S VR Micro-Nikkor 105 mm 1:2,8 G IF-ED) bei Blende 22 Verwendung. Zur diffusen Beleuchtung der Probe wurden die Sichtfenster allseitig mit weißem Papier abgedeckt und von außen durch ein Systemblitzgerät (Metz Mecablitz 60 CT-2) beleuchtet. Der Winkel zwischen der Horizontalen der Probe und der Objektivachse betrug 25° . Zur Vermessung der Luftfläche wurden die Bilder zunächst in ein Schwarz-Weiß Bitmap umgewandelt, dabei markierte der Schwellwert den durch Totalreflektion erkennbaren Rand der Luftschicht. Schwarze Pixel wurden dem Hintergrund zugeordnet, während weiße Pixel die reflektierende Luft-Wasser Grenzfläche darstellen. Die Region, in der sich im Bild die Struktur zur Haltung der Luftschicht befindet, wurde markiert und die anteilige Größe der reflektierenden Luft-Wasser Grenzfläche durch Bildung des Mittelwertes der Grauwerte für diese Region bestimmt. Dieser Wert liegt zwischen 0 (keine Luftschicht) und 1 (vollständige Luftschicht). Auf diese Weise wird für eine feste Dauer von 5 min, bei einer fest eingestellten Geschwindigkeit, die relative Größe der Luft haltenden Fläche A (bezogen auf die Größe der sichtbaren Luft-Wasser Grenzfläche A_0 bei einer Anströmung von $u = 0$ m/s) ermittelt. Nach Ablauf dieser Zeitspanne wurden die Proben aus der Messstrecke entnommen und mit Luft getrocknet, wonach sie für ein weiteres Experiment bereit waren.

Ergebnisse

Die Untersuchung der hydrophoben Mikrosäulenproben zeigen, dass die Luftschicht die durch die Mikrosäulen gehalten wird, erst oberhalb von einer Anströmung von $v = 1,75$ m/s ein Ablöseverhalten zeigt (Abb. 2). Dies ist einer der höchsten bisher gemessenen Werte für die Lufthaltung an synthetischen Oberflächen. Bereits bevor die Luftschicht begann sich abzulösen, wurde beobachtet, dass sie ein leichtes Vibrations- bzw. ein Schwingungsverhalten zeigte, bei dem sich die Krümmung der Oberfläche der Luftschicht geringfügig änderte. Dies geschieht zum einen dadurch, dass die Luft komprimiert oder expandiert wird. Zum anderen kann man das Schwingen der Luftschicht beobachten, da es zu einem Impulsübertrag des anströmenden Wassers auf die Luftschicht gibt, wodurch diese mit der Strömung mitgerissen und verwirbelt wird. Diese Schwingungen werden in ihrer Amplitude umso deutlicher, desto höher die Anströmgeschwindigkeit gewählt wird. Mit zunehmender Dauer der Anströmung nimmt die mit Luft bedeckte Fläche A ab, sofern die Geschwindigkeit der Anströmung groß genug ist, um die Luft aus den Proben zu lösen. Die Mikrosäulenproben stellten sich als anfällig für geringe Störungen der Luftschicht heraus. Diese können beim Eintauchvorgang auftreten oder durch kleine, fertigungsbedingte Löcher oder Blasen in den Mikrosäulenstrukturen entstehen. Im Resultat führt dies in diesem Fall selbst bei geringeren Geschwindigkeiten dazu, dass sich ein Teil der Luftschicht ablöst, was sich negativ auf die gesamte Stabilität der Luftschicht auswirkt. Abgesehen von den lokalen Instabilitäten die nicht reproduzierbar und verhältnismäßig zufällig auftraten, wurde in allen Experimenten übereinstimmend beobachtet, dass sich die Luftschicht zuerst an der aus Richtung der Anströmung gegenüberliegenden Probenkante ablöst.

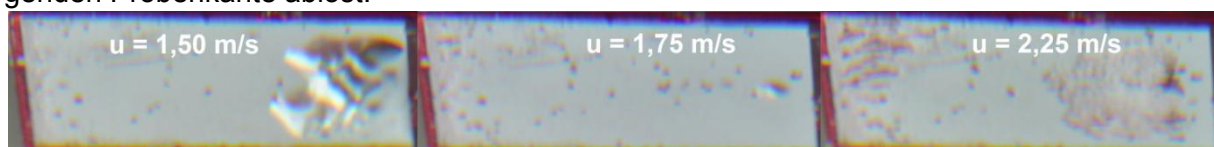


Abbildung 2: Fotografische Aufnahmen einer hydrophoben Mikrosäulenprobe bei verschiedenen Anströmungsgeschwindigkeiten nach 5 min Anströmdauer. Die hellen Bereiche stellen die Reflektionen der Luft-Wasser Grenzfläche dar. Die Strömung kommt von rechts. Die kleinen runden dunklen Flächen stellen Produktionsfehler dar, an denen keine Säulenstruktur vorhanden ist. Die Struktur die im linken Bild zu erkennen ist, stellt eine Störung der Luftschicht dar.

Die Auswertung der mit Luft bedeckten Fläche (Abb. 3), durch Ausnutzung der Totalreflexion, gestaltete sich für die Mikrosäulen als schwierig, da die vorliegenden Proben selbst reflektierend waren, weswegen schwer zwischen einer Luftschicht und der eigentlichen Probe zu unterscheiden war. Für zukünftige Untersuchungen empfiehlt sich daher die Verwendung von schwarzen Proben, welche nicht im sichtbaren Wellenlängenbereich reflektieren.

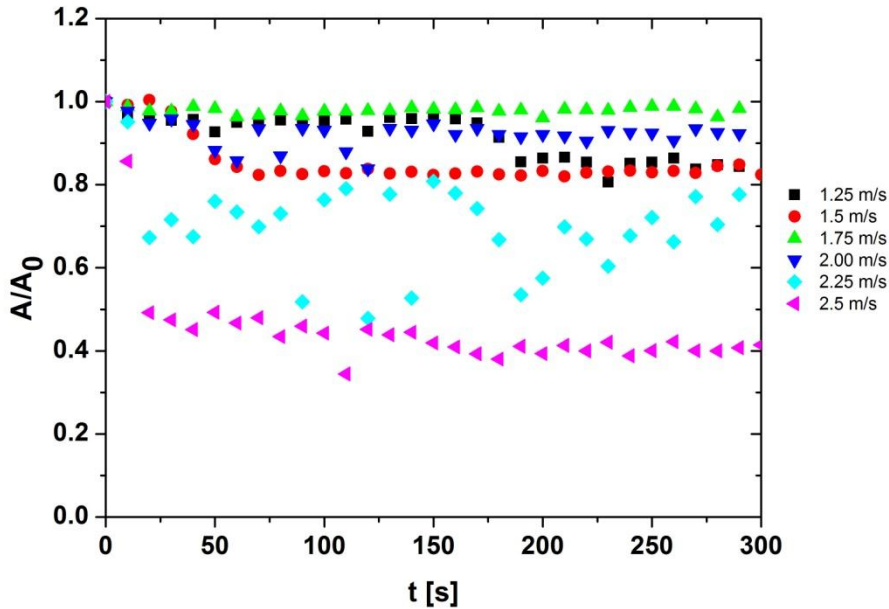


Abbildung 3: Zeitlicher Verlauf der relativen mit Luft bedeckten Fläche A/A_0 für verschiedene Anströmungsgeschwindigkeiten bei einer hydrophoben Mikrosäulenprobe.

Aus den vorliegenden Daten lässt sich nun für den Zeitpunkt $t = 5 \text{ min}$ nach Beginn der Anströmung die mit Luft bedeckte Fläche bei verschiedenen Anströmgeschwindigkeiten vergleichen (Abb. 4).

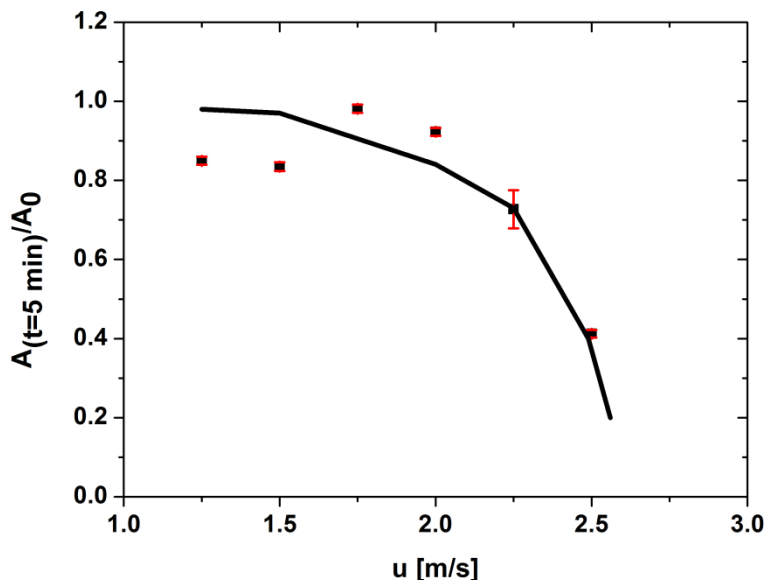


Abbildung 4: Relative mit Luft bedeckten Fläche $A(t=5 \text{ min})/A_0$ bei verschiedenen Anströmungsgeschwindigkeiten. Als Fehler ist die Standardabweichung der letzten 5 Aufnahmen einer jeden Messreihe angegeben. Die eingezeichnete Kurve stellt einen plausibilisierten Kurvenverlauf dar.

Diskussion

Es zeigte sich, dass die hydrophoben Mikrosäulenproben eine hohe Stabilität aufweisen, da sie Luft bis zu einer Anströmgeschwindigkeit von $1,75 \text{ m/s}$ zu 100% halten können, was den bislang höchsten Wert für hydrophoben Probenbeschichtung darstellt und damit in den Be-

reich der Lufthaltefähigkeit des Rückenschwimmers *Notonecta* gelangt (Melskotte, 2011). Die Anströmgeschwindigkeit von 1,75 m/s übertrifft bereits deutlich die Geschwindigkeit am Rand der viskosen Unterschicht am Schiffsrumpf eines Frachtschiffes (in Fahrt mit 10 m/s). Dementsprechend ließen sich auch schwere Frachtschiffe bei ihren üblichen Fortbewegungsgeschwindigkeiten mittels Mikrosäulen derart beschichten, dass sie eine permanent Luft haltende Schicht aufrechterhalten, was in Konsequenz die Reibung vermindert und daher auch die Transportkosten senkt. In welchem Zusammenhang die Stabilität der Luftschicht mit der Reibungsreduktion steht, wird in zukünftigen Studien überprüft werden, da es in praktischen Anwendungen von Luft haltenden Schichten auch darum geht, einen Kompromiss zwischen hoher Reibungsreduktion und gleichzeitig hoher Stabilität bei verschiedenartigen Anströmungen zu finden. Die hier dargestellten Ergebnisse liefern nun deutliche Hinweise darauf, dass die Stabilität der hydrophoben Mikrosäulen ein sehr hohes Weiterentwicklungspotential aufweist. In zukünftigen Experimenten werden daher Mikrosäulen untersucht, die mit hydrophilen Spitzen versehen sind und somit den „Salvinia-Effekt“ (Barthlott et al. 2010, Mayser et al. 2014) ausnutzen, um die Stabilität der Luftschicht nochmals zu erhöhen. Im Ergebnis der Untersuchungen konnte auch festgestellt werden, dass der Kavitationskanal K21 gute Bedingungen für den Einsatz optischer Beobachtungsverfahren bietet. Da sich an der Anlage Druck, Anströmgeschwindigkeit und Turbulenzgrad exakt einstellen lassen, ist er für die systematische Untersuchung der einzelnen Einflussfaktoren auf die Stabilität der Luftschicht gut geeignet.

Danksagung

Wir danken den Kollegen des Lehrstuhls für Strömungsmechanik, insbesondere Herrn Ulf Grebin, für die hilfreichen Diskussionen und die Unterstützung bei der Aufnahme der Messdaten. Die technische Ausstattung des K21 wurde durch Mittel des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung und des Bundeslandes M/V finanziert.

Literatur

- Barthlott, W., Schimmel, Th., Wiersch, S., Koch, K., Brede, M., Barczewski, M., Walheim, S., Weis, A., Kaltenmaier, A., Leder, A., Bohn, H. F.: The Salvinia Paradox: Superhydrophobic Surfaces with Hydrophilic Pins for Air Retention Under Water, *Adv. Mater.* 2010, 22, 1–4
- Ditsche-Kuru, P., Schneider, E. S., Melskotte, J.-E., Brede, M., Leder, A., Barthlott, W.: 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.: Not drowning but photosynthesizing: probing plant pastrons, *New. Phytol.* 2008, 177, 841-845
- Mayser, M. J., Bohn, H. F., Reker, M., Barthlott, W.: Measuring air layer volumes retained by submerged floating-ferns *Salvinia* and biomimetic superhydrophobic surfaces, *Beilstein J. Nanotechnol.*, 2014, 5, 812-821
- Melskotte, J.-E., Brede, M., Wriggers, W., Mayser, M., Leder, A., Barthlott, W.: Luft haltende Oberflächen zur Reibungsreduktion – künstliche Oberflächen und ihre biologischen Vorbilder, *Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik*, 19. Fachtagung, 2011
- Kröger, W., Wolter, A., Damaschke, N., Leder, A., Borchert, S., Höhne, S.: Messtechnikentwicklung für Kavitationsuntersuchungen am Kavitationstunnel K21 der Universität Rostock, *Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik*, 20. Fachtagung, 2012
- Thorpe, W. H., Crisp, D. J., Studies on plastron respiration. IV. Plastron respiration in the coleopteran, *J. Exp. Biol.* 1949, 26, 219-261