

## Erhöhte Steuerbarkeit von Unterwasserfahrzeugen durch passiv-adaptive Flossen

C. Strehse, R. Klemenz, M. Paschen

Universität Rostock, Lehrstuhl für Meerestechnik  
Albert-Einstein-Straße 2, 18059 Rostock

### Motivation

Es ist in der Fachwelt unstrittig, dass die Erforschung und nachhaltige Nutzung der Meere und ihrer Ressourcen die Verfügbarkeit unterschiedlichster unbemannter fernsteuerbarer und autonom operierender Unterwasserfahrzeuge voraussetzt. Beispielhaft seien hier Unterwasserfahrzeuge und Roboter genannt für die Installation, die Wartung und den Betrieb von Systemen und Bauwerken zahlreicher Offshore-Technologien wie Offshore-Windenergie, Tiefseebergbau, Technologien zur Meeresenergieumwandlung<sup>1</sup>, autarke Offshore-Aquakultur oder Küstenschutz. Der Einsatz von autonomen Unterwasserfahrzeugen ist ebenso ein Beitrag zur Senkung der gewaltigen Kosten für den Bau und den Betrieb von Forschungsschiffen, die heute noch in Größenordnungen für die Meeresforschung und –überwachung erforderlich sind.

Unabhängig von der konkreten Aufgabe müssen diese Fahrzeuge über einen ausreichend hohen Grad an Steuer- und Regelbarkeit verfügen, um beispielsweise vorgegebene Ziele ansteuern oder Hindernissen rechtzeitig ausweichen zu können und dabei stets stabile Bewegungsabläufe zur Gewährleistung akkurater Messungen und Beobachtungen zu ermöglichen.

Das am häufigsten verwendete technische Mittel zur Erzeugung hydrodynamischer Steuerkräfte und -momente sind starre Flossen, analog der Tragflügel beim Flugzeug. Diese weisen als Steuerelemente allerdings den entscheidenden Nachteil auf, dass bei einem kritischen Anstellwinkel abrupt ein Strömungsabriss auftritt, in dessen Folge der erzeugte Auftrieb erheblich abnimmt und der Bewegungsablauf des Fahrzeugs instabil wird. Der kritische Winkel ist dabei nur unwesentlich größer als jener, der beim maximalen hydro- bzw. aerodynamischen Auftrieb erreicht wird. Je nach Profilwölbung liegt dieser in der Größenordnung von ca. 15°. Damit ist der für eine Steuerung nutzbare Winkelbereich sehr eingeschränkt. Das gilt insbesondere dann, wenn der Anstellwinkel aus Sicherheitsgründen deutlich unter dem des maximalen Auftriebs liegen muss.

Bei der Beobachtung der Natur fällt schnell auf, dass sich auch bei Meeressäugern und Fischen Flossen als primäre Steuermechanismen durchgesetzt haben. Jedoch fällt, beispielsweise bei der Betrachtung von Delfinen, ebenso schnell auf, dass diese kein Problem mit einem plötzlichen Auftriebsverlust zu haben scheinen. Sie sind in der Lage auch extreme Richtungswechsel und Manöver, die für Unterwasserfahrzeuge undenkbar wären, im Sinne von Steuerbarkeit und Stabilität scheinbar problemlos vollziehen zu können.

Dass die Zirkulation im Falle dreh-schwingender Tragflügel-ähnlicher Strukturen auch bei größeren Anstellwinkeln kurzzeitig stabil bleiben kann und damit kurzzeitig auch höhere Auftriebskräfte erreichbar sind, ist bekannt, siehe u.a. Daartz (1988). Dieses zumeist auf hydro- bzw. aeroelastische Effekte zurückzuführende Phänomen führt in der Regel jedoch zur Destabilisierung von Bewegungsabläufen. Insofern liegt die Vermutung nahe, dass die Mee-

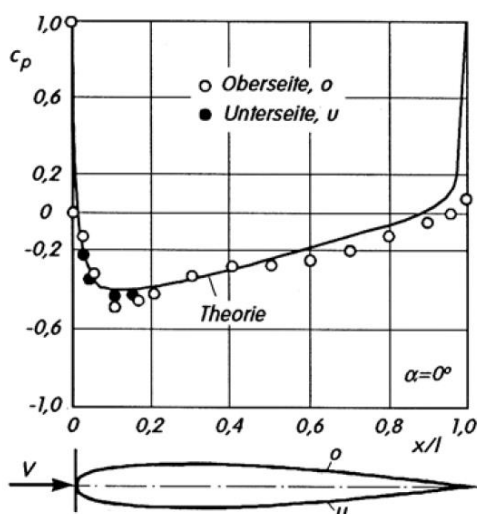
<sup>1</sup> Hierunter sind insbesondere Technologien subsummiert, die der Energieumwandlung von Meereswellen, Meeresströmungen, Gezeiten und Meeresthermik in vorrangig elektrische Energie dienen.

ressäuger über andere Mechanismen verfügen, die einen plötzlichen Strömungsabriss verzögern und damit den resultierenden Auftriebsverlust verringern können.

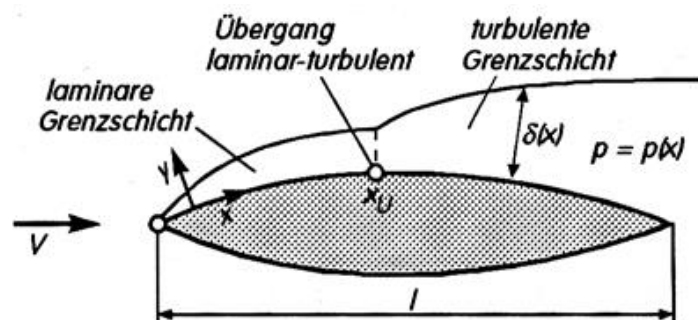
In Anbetracht der Effektivität, die diese Mechanismen in der Tierwelt zu haben scheinen, ist es von großem Interesse diese zu studieren und ggf. auf technische Anwendungen zu adaptieren. Studien dazu werden seit ca. einem Jahr am Lehrstuhl Meerestechnik der Universität Rostock durchgeführt. Erste Ergebnisse sind in den Arbeiten von Klemenz (2017 und 2018) zu finden. Darin enthaltene Ergebnisse werden im Folgenden präsentiert.

## Stand der Forschung und Vorarbeiten

Wie in Schlichting & Gersten (2006) beschrieben, ruft die Umströmung eines Tragflügels auf dessen Oberfläche eine Druckverteilung hervor, wie sie in Abb. 1 dargestellt ist. Solange sich der Tragflügel verdickt, wird Druck in kinetische Energie umgewandelt. Das Gegenteil geschieht auf dem sich verjüngendem Profilabschnitt, wodurch die körpernahe Strömungsgrenzschicht turbulent wird, wie es in Abb. 2 veranschaulicht ist. Wird der sich einstellende Druckgradient zu groß, als dass die kinetische Energie der strömenden Teilchen ausreicht, um diese Barriere zu überwinden, löst sich die Grenzschicht vom Tragflügel ab. Das führt zu einer drastischen Verringerung des erzeugten Auftriebs. Weil der Auftrieb zusammen mit dem Druckgradienten bei steigendem Anstellwinkel zunimmt, führt das zu der misslichen Situation, dass der Strömungsabriss auftritt, kurz nachdem der Tragflügel seinen maximalen Auftrieb generiert. Dieser Umstand ist für die Steuerung und Regelung von Unterwasserfahrzeugen besonders kritisch, weil die Flossen nur in einem sehr begrenzten Bereich angestellt werden können, um Strömungsabriss zu vermeiden. D.h. ein Betreiben der Flossen im Bereich ihres maximalen Auftriebs sollte ausgeschlossen werden. Um dieser Herausforderung technisch zu begegnen, wurden in der Vergangenheit unterschiedliche passive und aktive Mechanismen entworfen und untersucht, von denen nachfolgend einige Erwähnung finden.



**Abb. 1: Druckverteilung auf der Oberfläche eines Tragflügels nach Schlichting & Gersten (2006).**



**Abb. 2: Ausbildung einer turbulenten Grenzschicht an einem Tragflügel nach Schlichting & Gersten (2006)**

In Chandrasekhara et al. (2001) wird ein aktiv-adaptives Konzept vorgestellt, bei dem sich die Vorderkante eines NACA 0012 Tragflügels durch Servomotoren verformen lässt. Es wurde herausgefunden, dass das Abreißen der Grenzschicht durch eine Änderung der Druckverteilung auf dem Tragflügel verzögert oder gar komplett unterbunden werden kann.

Ein weiteres aktives Konzept zur Kontrolle der Auftriebskräfte an einem Tragflügel wird in Bak et al. (2007) erläutert. Hier wurde das Modell eines Windrad-Flügels an der Hinterkante mit Piezo-Aktuatoren ausgestattet, um eine Adaptivität umzusetzen. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass eine kleine Änderung in der Krümmung der Hinterkante ausreicht, um

nutzbare Änderungen in den Auftriebskurven hervorzurufen, während die Widerstandskräfte unverändert blieben.

In Diangui & Guoqing (2013) wird ein passives Konzept untersucht. Hier wird ein mit Luft gefüllter NACA 0012 Tragflügel simuliert. Dieser passt automatisch seine Oberfläche an die Druckverteilung an, die sich für verschiedene Anstellwinkel einstellt. Die Oberfläche wird in Bereichen hohen Drucks nach innen und in Bereichen niedrigen Drucks nach außen verformt. Das resultiert insgesamt in einem höheren Druck auf der Druckseite und einem geringeren Druck auf der Saugseite des Tragflügels, wodurch der erzeugte Auftrieb erhöht wird. Außerdem können die Druckgradienten verringert und somit ein Strömungsabriss verzögert werden.

Gute Ansätze zum Finden weiterer Konzepte bietet ein Blick in die Natur, wo erfolgreiche Mechanismen zur Strömungskontrolle existieren. Einige aktive und passive Beispiele, die sich bei großen Meereslebewesen wie Walen und Delfinen durchgesetzt haben, werden in Fish et al. (2008) erläutert. Bei der Betrachtung dieser Lebewesen fällt auf, dass die Hinterkante ihrer Flossen flexibel gestaltet ist. Welchen Einfluss das auf die hydrodynamischen Kräfte hat, wurde von Klemenz (2017 und 2018) untersucht.

### Material und Methoden

Für die Untersuchungen wurden zwei Modelle identischer Geometrie im 3D-Druck-Verfahren gefertigt. Beide Modelle sind am NACA 0015 Profil orientiert, haben eine Höhe von 400 mm und eine Sehnenlänge von 160 mm. Das erste Modell ist als starre Konstruktion ausgeführt. Das zweite ist partiell verformbar. Beim Drucken der starren Flosse wurde ein Filament aus Polylactid (PLA) verwendet. Zur Herstellung der passiv-adaptiven Flosse wurden simultan zwei Filamente genutzt. Zum einen PLA und zum anderen PolyFlex. Beim letztgenannten handelt es sich um einen Kunststoff, der nach dem Druckverfahren elastische Eigenschaften aufweist. Das für den Druck verwendete hybride Design ist in Abb. 3 gezeigt. Darauf sind die mit PLA gedruckten Bereiche in orange und jene, die aus PolyFlex bestehen, in weiß dargestellt. Weil ausschließlich der Einfluss der Adaptivität der Hinterkante auf den Auftriebsverlust beim Abriss der Strömungsgrenzschicht untersucht werden soll, sind lediglich die hinteren 50% der Flosse aus flexiblem Material gestaltet, während die vordere Hälfte einen starren Kern aus PLA besitzt. Aufgrund des direkten Einflusses vom Füllgrad des flexiblen PolyFlex auf die Steifigkeit der Hinterkante, wurden in Vorversuchen zunächst empirisch geeignete Parameter ermittelt. Bei einem Füllgrad von 35%, der schließlich bei der Herstellung der hybriden Flosse Verwendung fand, besitzt die Hinterkante ausreichend Steifigkeit, um nicht schon bei geringen Reynoldszahlen verformt zu werden.

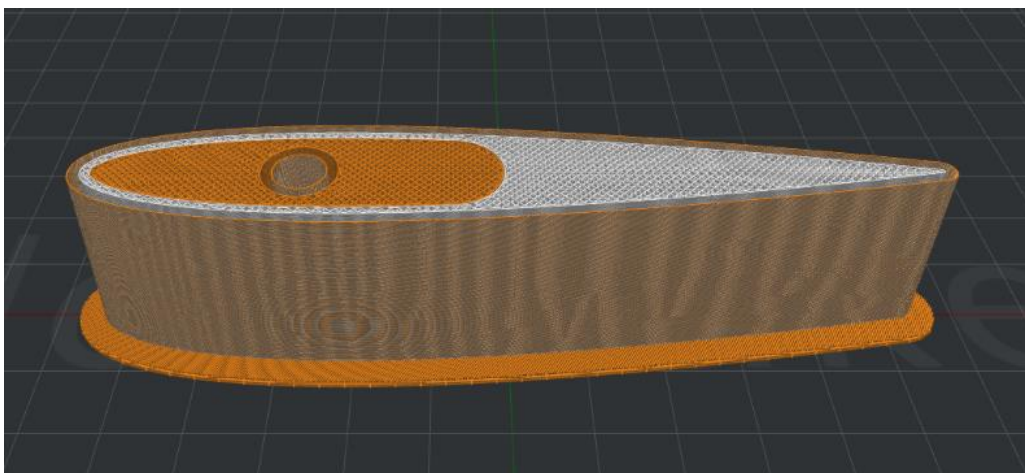


Abb. 3: Hybrides Flossendesign, orange – PLA, weiß – PolyFlex (Füllgrad 35%).

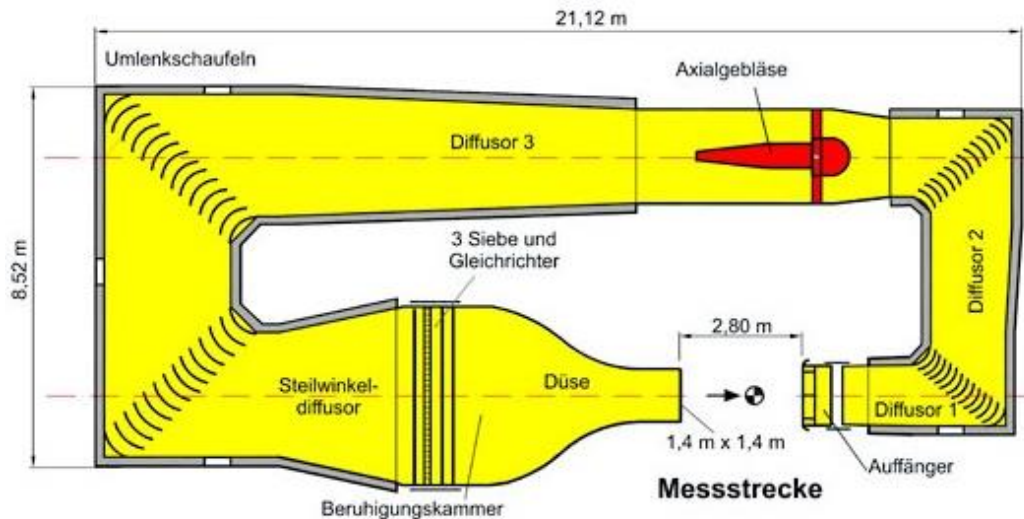


Abb. 4: Großer Windkanal der Universität Rostock.

Zur Bestimmung der Beiwerte dieser Modelle werden Messungen im großen Windkanal der Universität Rostock durchgeführt. Dessen Konstruktion und Abmessungen sind Abb. 4 zu entnehmen. Der Aufbau zur Messung der Kräfte ist in Abb. 5 dargestellt. Das zu vermessende Modell (2) ist in 1300 mm Entfernung zur Kante der Düse (1) auf einem Drehtisch montiert, der wiederum an einer 6-Komponenten-Kraftwaage fixiert ist. Zwischen Kraftwaage und Modell befindet sich eine große Endplatte. Eine weitere Endplatte (3) wird über eine Traverse in einem Abstand von 1 mm oberhalb des Modells positioniert, um das Auftreten von Randwirbeln zu vermeiden. Bei der Untersuchung der Flossen wurden sowohl die Anströmgeschwindigkeit, als auch der Anstellwinkel variiert. Zum Generieren der Beiwertkurven wurden die resultierenden Kräfte für jeden Anstellwinkel über einen Zeitraum von 10 s gemessen und gemittelt. Aus den gemessenen Kräften, der Dichte  $\rho$  und Geschwindigkeit  $v$  der Strömung, sowie der Oberfläche  $A$  der Flossen, wird dann der Auftriebsbeiwert für jeden Anstellwinkel berechnet.

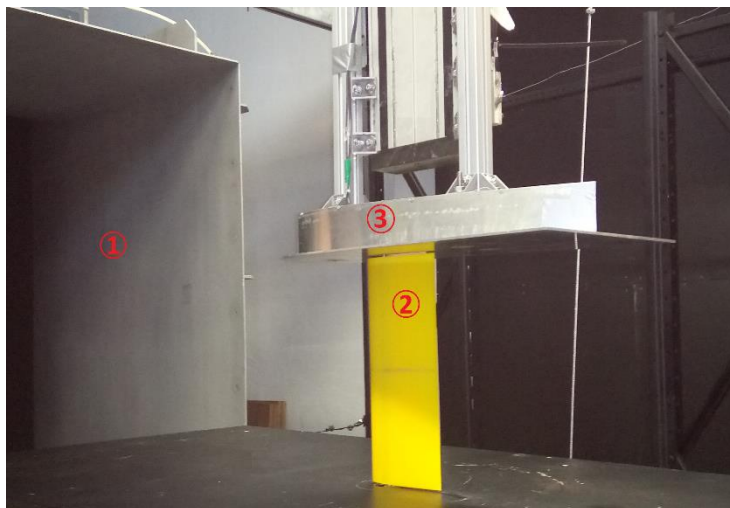


Abb. 5: Versuchsstand im Windkanal: 1-Windkanaldüse, 2-Flossenmodell auf Kraftwaage, 3-Endplatte.

Bei der Untersuchung der Flossen wurden sowohl die Anströmgeschwindigkeit, als auch der Anstellwinkel variiert. Zum Generieren der Beiwertkurven wurden die resultierenden Kräfte für jeden Anstellwinkel über einen Zeitraum von 10 s gemessen und gemittelt. Aus den gemessenen Kräften, der Dichte  $\rho$  und Geschwindigkeit  $v$  der Strömung, sowie der Oberfläche  $A$  der Flossen, wird dann der Auftriebsbeiwert für jeden Anstellwinkel berechnet.

$$c_a = \frac{F_a}{\frac{\rho}{2} \cdot v^2 \cdot A} \quad [1]$$

## Ergebnisse

Für den Vergleich der Auftriebsbeiwerte des starren und hybriden Modells wurden die Kräfte für Anstellwinkel in einem Bereich von  $-25^\circ$  bis  $+25^\circ$  bei Anströmgeschwindigkeiten zwischen 15 m/s und 40 m/s bestimmt. Für die verwendeten Modelle entspricht das Reynoldszahlen von  $2,37 \cdot 10^5$  bis  $6,32 \cdot 10^5$ . Um eine bessere Vergleichbarkeit zu ermöglichen, wurden die erhaltenen Werte auf den maximalen Auftrieb des starren Modells normiert.

In Abb. 6 und Abb. 7 sind die normierten Auftriebsbeiwerte der beiden Modelle für eine Reynoldszahl von  $5,53 \cdot 10^5$  beziehungsweise  $6,32 \cdot 10^5$  aufgezeigt. Die Darstellung beschränkt sich dabei auf einen Anstellwinkelbereich von  $12^\circ$  bis  $25^\circ$ . In diesem Bereich erreichen die Flossen ihren maximalen Auftrieb, kurz bevor ein Strömungsabriss auftritt. Bei näherer Betrachtung der Ergebnisse fällt auf, dass der maximal erreichte Auftrieb für das hybride Modell geringer ist. Das lässt sich vermutlich vor allem auf die rauere Oberfläche zurückführen.

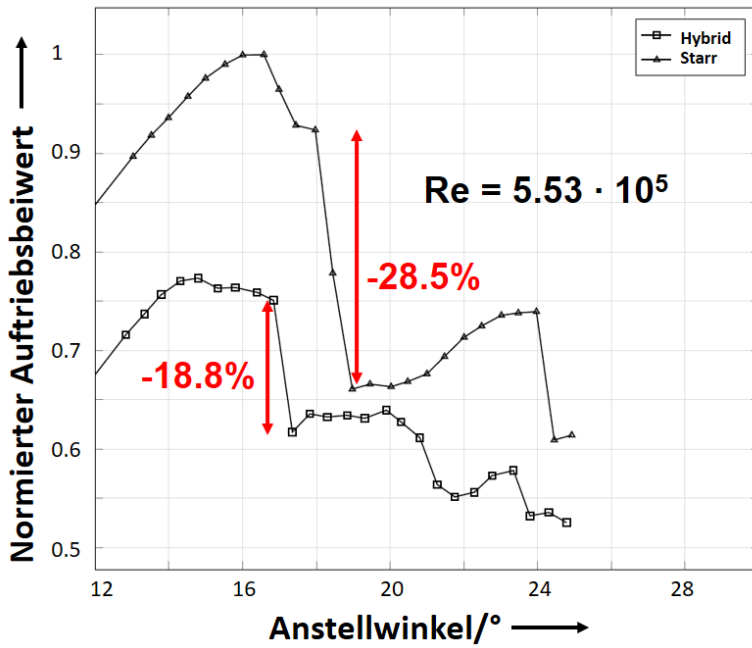


Abb. 6: Normierter Auftriebsbeiwert für starres und hybrides Design bei  $Re=5,53E+5$ .

nahezu konstant und fällt anschließend ungleichmäßig ab.

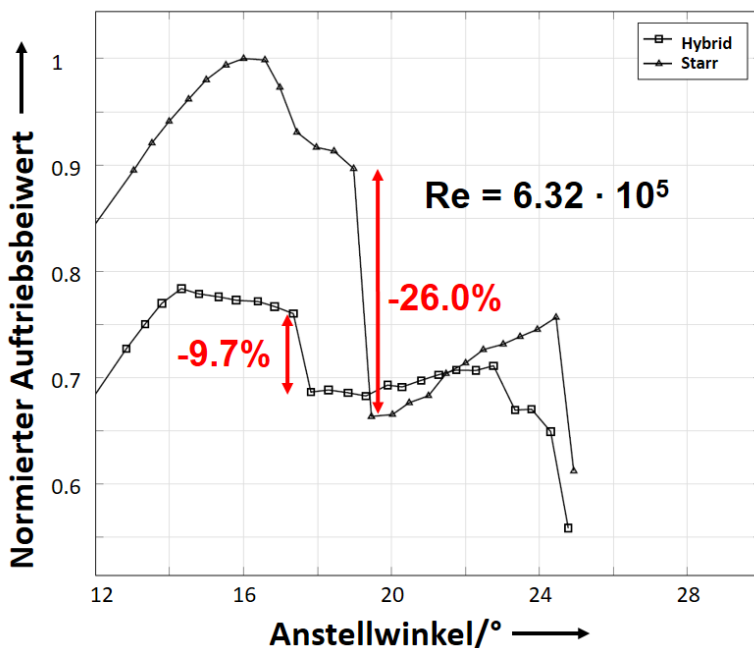


Abb. 7: Normierter Auftriebsbeiwert für starres und hybrides Design bei  $Re=6,32E+5$ .

Dennoch sind die Wirkungen der flexiblen Hinterkante der hybriden Flosse erkennbar. Wie Abb. 6 zu entnehmen ist, erreicht die starre Flosse für  $Re = 5,53 \cdot 10^5$  ihren maximalen Auftrieb bei  $16,5^\circ$ . Dieser nimmt bis zu einem Anstellwinkel von  $18^\circ$  kontinuierlich ab und erfährt anschließend einen abrupten Einbruch um 28,5%. Für Winkel ab  $19^\circ$  steigt der Auftrieb wiederum etwas an, bis er bei  $24^\circ$  erneut abrupt einbricht. Beim hybriden Design wird der maximale Auftrieb bereits bei  $15^\circ$  erreicht, bleibt dann allerdings nahezu konstant, bis er bei  $17^\circ$  um 18,8% einbricht. Der relative Auftriebsverlust ist verglichen mit dem starren Design deutlich geringer. Im Bereich von  $17,5^\circ$  bis  $21^\circ$  bleibt der Auftrieb abermals

Bei der Betrachtung von Abb. 7 wird deutlich, dass die Effekte, welche durch die flexible Hinterkante verursacht werden, mit steigender Reynoldszahl zunehmen. Der Verlauf für die starre Flosse ist für  $Re = 6,32 \cdot 10^5$  erwartungsgemäß nahezu identisch mit dem zuvor beschriebenen Verlauf für  $Re = 5,53 \cdot 10^5$ . Auch hier wird der maximale Auftriebswert bei einem Anstellwinkel von  $16,5^\circ$  erreicht. Er nimmt bis zu einem Winkel von  $19^\circ$  ab und erfährt bis  $19,5^\circ$  einen starken Einbruch um 26%. Bis zu einem Anstellwinkel von  $24,5^\circ$  steigt der Auftrieb langsam an, bis er bei  $24,5^\circ$  erneut einbricht. Beim hybriden Design ist verglichen mit dem

in Abb. 6 dargestellten Verlauf eine starke Abweichung erkennbar nachdem der Strömungsabriss auftritt. Der Auftrieb hat hier sein Maximum bei  $14,5^\circ$  erreicht, bleibt bis  $17,5^\circ$  etwa konstant und bricht dann vergleichsweise wenig um 9,7% ein. Im Bereich von  $18^\circ$  bis  $23^\circ$  ändert sich der Auftrieb kaum und fällt anschließend ab. Es wird besonders deutlich, dass der abrupte Strömungsabriss für höhere Reynoldszahlen beim hybriden Modell weniger stark ausfällt und außerdem der erzeugte Auftrieb nach Abriss der Strömung über einen weiteren Bereich erhalten bleibt. Diese Beobachtungen entsprechen dem erwarteten Verhalten, weil die flexible Hinterkante des hybriden Modells bei höherer Anströmgeschwindigkeit eine größere Verformung erfährt. Bei weiter steigenden Reynoldszahlen ist zu erwarten, dass diese Effekte weiter zunehmen und ab einer kritischen Reynoldszahl das hybride Design nach Auftritt des Strömungsabrisse mehr Auftrieb erzeugt als sein starres Gegenstück, wie es in Abb. 7 bereits im Bereich von  $19,5^\circ$  bis  $21,5^\circ$  der Fall ist.

Außerdem wurde beobachtet, dass sich das hybride Modell für niedrige Reynoldszahlen ähnlich dem starren Modell verhält. Das ist darauf zurückzuführen, dass das verwendete flexible Filament über eine vergleichsweise hohe Steifigkeit verfügt und so erst bei relativ hohen Reynoldszahlen überhaupt eine Verformung der Hinterkante auftritt.

## Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen der Untersuchungen wurde gezeigt, dass der Auftriebsverlust beim Auftritt eines abrupten Strömungsabrisse durch ein passiv-adaptives Flossendesign erheblich verringert werden kann. Hierbei wurde die Adaptivität der Flosse auf den Bereich der Hinterkante beschränkt. Dazu wurde im 3D-Druck-Verfahren ein Flossenmodell gefertigt, bei dem der Druckvorgang simultan mit starrem und flexiblem Filament erfolgte. Das so hergestellte hybride Modell wurde mit einem Modell von identischer Geometrie verglichen, das komplett aus starrem Filament gedruckt wurde. Allerdings konnte der maximale Auftrieb des starren Tragflügels nicht erreicht werden. Die Gründe hierfür sind in weiteren Untersuchungen noch zu klären.

In vorangegangenen studentischen Arbeiten wurden bereits erfolgreich hybride Flossen, die aus einem Stahlgerüst und Silikon bestehen, im Gussverfahren hergestellt. Mit Hilfe dieses Verfahrens kann in zukünftigen Arbeiten unter Verwendung unterschiedlich harter Silikone der Einfluss der Steifigkeit auf die passive Adaptivität der Flosse untersucht werden. So können die bzgl. der Materialkomposition optimalen Parameter für unterschiedliche Reynoldszahlen gefunden werden. Weiterhin ist das Problem der unterschiedlichen Oberflächengüte der verschiedenen Modelle zu lösen. Dazu wäre beispielsweise eine Beschichtung der Modelle denkbar.

Bisher wurden nur die Kräfte am verformbaren Tragflügel gemessen. Zukünftigen Untersuchungen wird die gleichzeitige Messung der unter dem Strömungseinfluss verformten Flügelkontur gemessen. Die Ergebnisse dieser Messungen werden die Grundlage für vergleichende CFD-Simulationen bilden. Die Verformungen werden mit dem Motion-Capture-Verfahren durchgeführt, das jüngst in Vorarbeiten am Lehrstuhl Meerestechnik bereits erfolgreich zur Messung der Bewegung und Verformung einer anderen als hier vorgestellten flexiblen Flosse verwendet wurde.

## Literatur

Bak, C. et al., (2007). Wind Tunnel Test on Wind Turbine Airfoil with Adaptive Trailing Edge Geometry. *45th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, January 8-11, 2007*. Reno, Nevada.

Chandrasekhara, M.S., Wilder, M.C. & Carr, L.W., (2001). *Compressible Dynamic Stall Control Using Shape Adaption*. *AIAA Journal*, Vol. 39, No. 10. pp.2021-2024.

Daartz, H., (1988). Experimentelle Untersuchungen an drehschwingenden Modellen pelagischer Profilscherbretter der DDR-Hochseefischerei. *Fischerei-Forschung*, Rostock, 26 (1988), Heft 4, pp. 61-66

Diangui, H. & Guoqing, W., (2013). Preliminary Study on the Aerodynamic Characteristics of an Adaptive Reconfigurable Airfoil. *Aerospace Science and Technology*, Vol. 27, No. 1. pp.44-48.

Fish, F.E., Howle, L.E. & Murray, M.M., (2008). Hydrodynamic Flow Control in Marine Mammals. *Integrative and Comparative Biology*, Vol. 48, No. 6. pp.788-800.

Klemenz, R., (2017). *Untersuchung hydrodynamischer Effekte in Folge einer flexiblen Hinterkante an einem Tragflügel*. Rostock: Studienarbeit an der Universität Rostock, Lehrstuhl Meerestechnik.

Klemenz, R., (2018). *Design and Development of an Experimental Setup for the Analysis of the Flow around Passive-Adaptive Airfoil Profils*. Rostock: Masterarbeit an der Universität Rostock, Lehrstuhl Meerestechnik.

Schlichting, H. & Gersten. K., (2006). *Grenzschicht-Theorie* (10., überarb. Aufl.). Berlin: Springer-Verlag. ISBN 978-3-540-23004-5.

