

Analyse von hydrodynamischen Querkräften an dreikardeelig geschlagenen Seilen

S. Schacht, M. Paschen

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

Zusammenfassung

In zahlreichen Bereichen der Meerestechnik werden links- oder rechtsherum gedrehte Seile und Trossen als Zuelemente oder als Bestandteil von Schleppsystemen eingesetzt. Es ist seit Jahren bekannt, dass die durch Verzwirnen mehrerer Litzen entstandenen Fäden, Seile, etc. bei Schräganströmung eine hydrodynamische Kraft induzieren, deren Wirkungsrichtung nicht in der von der Tangente der Trossen-Mittellinie und dem Vektor der Anströmung aufgespannten Ebene liegt, sondern senkrecht zu dieser orientiert ist. Damit gibt es an gedrehten Seilen formal eine strömungsinduzierte Kraft, die so nur von sich drehenden Zylindern bekannt ist (Magnus-Effekt). Es liegt die Vermutung nahe, dass die Oberflächenstruktur verzwirnter Fäden bei Schräganströmung eine Zirkulation hervorruft, die letztlich zu einer Auftriebskraft im Sinne von Kutta und Joukowski führt. Der Betrag dieser Kraft ist u. a. von der Oberflächenstruktur, dem Anstellwinkel und der Reynoldszahl des Fadens abhängig. Bekannt ist ferner, dass bei den Anströmwinkeln 0° und 90° diese Kraft verschwindet und im Bereich von 30° bis etwa 65° ihr Maximum besitzt, wobei die Drehrichtung des Fadens beachtet werden muss.

Ziel des Vortrags ist es, ein belastbares Konzept zur Ermittlung der Ursache für diese „Querkräfte“ vorzustellen, sowie erste Ergebnisse durchgeführter Untersuchungen zu präsentieren und zu diskutieren. Neben numerischen Strömungssimulationen bilden experimentelle Untersuchungen an 3D-gedruckten Seilmodellen die Grundlage für die Analysen.

Motivation

Hydrodynamisch induzierte Querkräfte an geschlagenen Seilen sind seit den Untersuchungen von STENGEL (1968) bekannt. In seiner Dissertation testete er verschiedene sechslitzige Seile des Seale-Typs im Niedergeschwindigkeitskanal des Institutes für Leichtbau in Dresden. Des Weiteren hat HAHLEBECK (1976) gezeigt, dass geschlagene Seile abhängig von ihrer Schlagrichtung in viskosen Medien eine Lateralbewegung erfahren.

Obwohl diese Phänomene lange bekannt sind, wurden die physikalischen Ursachen hierfür bislang nicht näher untersucht. Sind die physikalischen Ursachen der Fluid-Struktur-Interaktion bekannt, ist es möglich, durch konstruktive Maßnahmen die resultierenden Querkräfte so zu beeinflussen, dass sie für praktische Aufgabenstellungen gezielt genutzt werden können.

Modell

STENGEL (1968) vermutet, dass die Querkraft an geschlagenen Seilen aus dem durch die Anströmung hervorgerufenen, unterschiedlichen Widerstand an der Ober- und Unterseite der Struktur resultiert. Abhängig vom Anstellwinkel erfolgt auf der einen Seite eine Anströmung längs der Litzen und auf der anderen Seite quer dazu. Dies führt zu dem Schluss, dass auf der quer angeströmten Seite der Druck höher ist als auf der längs angeströmten, so dass sich zusätzlich zum Widerstand eine weitere Kraftkomponente ergibt.

Nach Auffassung der Autoren führt die Verzerrung gedrehter Seile bei verschiedenen Anstellwinkeln zur Erzeugung einer Zirkulation. Da durch den Schlag der Struktur sich der Querschnitt in Bezug auf die Anströmung über die Länge systematisch ändert, herrscht entlang der Längsachse des Seils demzufolge auch eine sich systematisch verändernde wandnahe Strömung. Solange die Seillängsachse senkrecht zur Anströmung orientiert ist, heben sich die unterschiedlichen, jedoch systematisch wiederkehrenden Strömungseffekte in ihrer integralen Wirkung auf. Sobald jedoch Anströmung und Seil ihre Orientierung zueinander ändern, entstehen offensichtlich Strömungseffekte, die man mit Hilfe einer Zirkulation darstellen kann.

Experimentelle Untersuchungen von PÜTTMANN (2016) zeigen, dass im Gegensatz zum umströmten glatten Zylinder der Nachstrom bei geschlagenen Trossen aus der von Anströmung und Mittellängsachse der Trosse gebildeten Ebene ausgelenkt wird – ein Effekt, der aus der Überlagerung von Parallelströmung und Zirkulation her bekannt ist.

Der Satz von Kutta-Joukowski beschreibt die dynamische Auftriebskraft F'_A als Produkt der Dichte ρ des umströmenden Mediums, der ungestörten Anströmung u_∞ und der Zirkulation Γ

$$F'_A = -\rho u_\infty \Gamma$$

wobei die Zirkulation das Resultat des Integrals

$$\Gamma = \oint v ds$$

ist. Die Strömungsbelastung \vec{F} folgt aus dem Integral des Drucks p über die Fläche dA .

$$\vec{F} = - \oint p \vec{n} dA$$

F'_A sollte demzufolge eine Komponente der Kraft \vec{F} sein. Insofern ist die Druckverteilung auf der Oberfläche von geschlagenen Seilen von Interesse.

Um die Effekte zu maximieren, wird in dieser Arbeit ein idealisiertes dreikardeeliges geschlagenes Seil verwendet. Dieses bietet zudem den Vorteil, dass es bis zu einem Schlagwinkel von ca. 40° mathematisch einfach zu beschreiben ist, wie SHITKOW & POSPECHOW (1957) bestätigen, und damit eine gute Grundlage für experimentelle und numerische Untersuchungen liefert. Bis zu diesem Bereich kann der Litzenquerschnitt durch eine Ellipse abgebildet werden. Zusätzlich kann angenommen werden, dass die kleine Halbachse der Ellipse stets zur Mittelachse des Seils weist. Des Weiteren wird davon ausgegangen, dass der Seilquerschnitt über die gesamte Länge kongruent ist. Die Oberflächenrauigkeit der einzelnen Litzen ist im Verhältnis zur strukturbedingten Rauigkeit des Seils vernachlässigbar gering und wird daher als glatt angenommen. Dies ermöglicht neben der mathematischen Beschreibung des Seilmodells auch die Umsetzung in einem CAD-

Modell, welches direkt für die numerische Strömungssimulation sowie für die Herstellung des physikalischen Modells mittels 3D-Druck-Technologie verwendet werden kann.

Im Experiment wird eine komplette Schlaglänge betrachtet. Eine Schlaglänge bezeichnet die Länge, die für eine komplette Windung einer Litze um die Seileinlage notwendig ist. Dazu wurde das Modell in mehrere zusammensetzbare Segmente unterteilt, wobei das mittlere Segment Bohrungen für Differenzdrucksensoren enthält, die direkt am Ort der Bohrung im Modell untergebracht werden.

Neben dem Seilmodell wurde ein Referenzzylinder mit identischen Abmaßen verwendet, um die Methodik zu validieren.

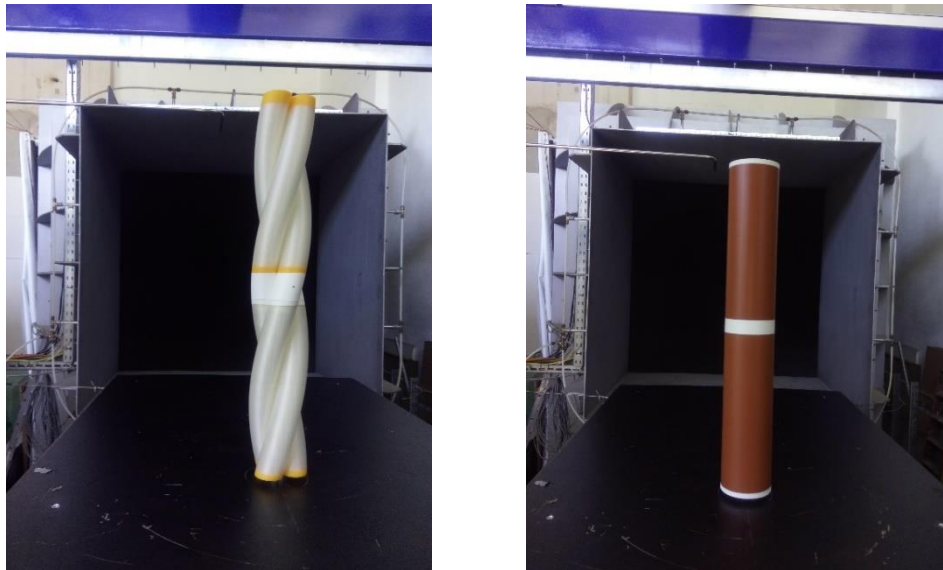


Abb. 1: Seilmodell (l.) und Referenzzylinder (r.) im Windkanal des Lehrstuhls für Meerestechnik

Abb. 1 zeigt die beiden fertigen Modelle aufgebaut im Windkanal. Die Länge beträgt jeweils ca. 700 mm und der Durchmesser 110 mm. Oberhalb der Modelle ist zusätzlich in der freien ungestörten Strömung ein Prandtl-Rohr angebracht.

Methoden

Im Vorfeld der experimentellen Versuche zur Druckmessung im Windkanal des Lehrstuhls für Meerestechnik wurden numerische Simulationen durchgeführt, um geeignete Differenzdrucksensoren zu wählen. Die numerische Simulation zur Bestimmung der Druckkoeffizienten auf der Oberfläche des Seilmodells und des Referenzzylinders erfolgten mit ANSYS CFX. Hierbei wurde als Methode RANS gekoppelt mit dem $k-\omega$ -SST-Modell durchgeführt. Abb. 2 zeigt das Rechenvolumen, das mit einem unstrukturierten Tetraedergitter und einer zusätzlichen Prismenschicht zur besseren Auflösung der Grenzschicht auf der Modelloberfläche automatisch vernetzt wurde. Der dimensionslose Wandabstand $y^+ < 1$ wurde in den Simulationen eingehalten.

Die Simulation wurde dem Experiment angepasst, um eine bessere Vergleichbarkeit zwischen den Ergebnissen zu erzielen. Das in der Simulation verwendete Fluid ist Luft mit einer dem realen Versuch ähnlichen Dichte, Viskosität und Temperatur. Da es nicht möglich ist diese Komponenten im Windkanal einzustellen, kann hier auch nur von weitestgehend ähnlichen Bedingungen gesprochen werden. Für die Versuche im Windkanal spielt auf Grund der offenen Messstrecke die Berücksichtigung der Tages- und Jahreszeit eine wesentliche Rolle.

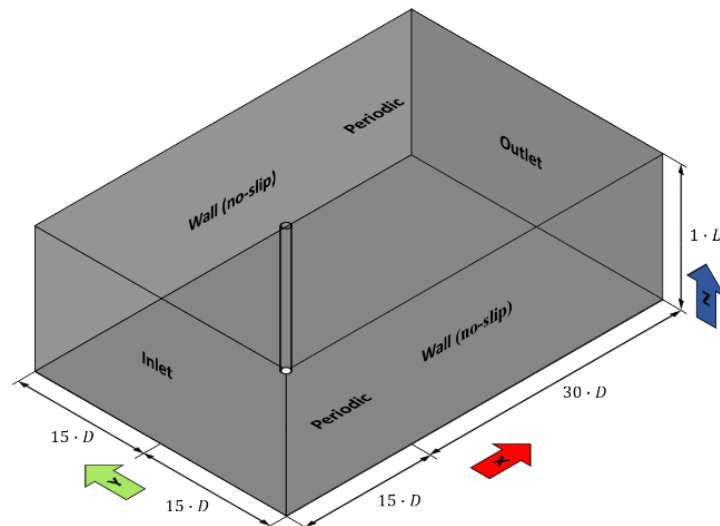


Abb. 2: Rechenvolumen und Randbedingungen

Basierend auf den Ergebnissen wurden die Differenzdrucksensoren AMS5915 mit einem Druckbereich von $p = \pm 2 \text{ kPa}$ und einer zeitlichen Auflösung von $f = 2 \text{ kHz}$ gewählt. Im Mittelsegment des Seilmodells sind drei Drucksensoren untergebracht, von denen jede den Druck an einer anderen Litze misst. Da die Litzen identisch und punktsymmetrisch zur Mittelachse sind, kann mit zehn unterschiedlichen Mittelsegmenten und einer geeigneten Positionierung der Druckbohrungen der Seilquerschnitt auf 4° genau aufgelöst werden. Durch die Rotation des Modells mittels eines Drehtisches werden überdies die Querschnitte einer gesamten Schlaglänge aufgelöst.

Die Versuche zur Bestimmung der Druckbeiwerte am Seilmodell und am Referenzzylinder finden im großen Windkanal des Lehrstuhls für Meerestechnik statt. Der Windkanal Göttinger Bauart hat eine offene Messstrecke mit einer Länge von 2,8 m, einen Düsenquerschnitt von 1,4 m x 1,4 m und deckt einen Geschwindigkeitsbereich von 5 m/s bis 60 m/s ab.

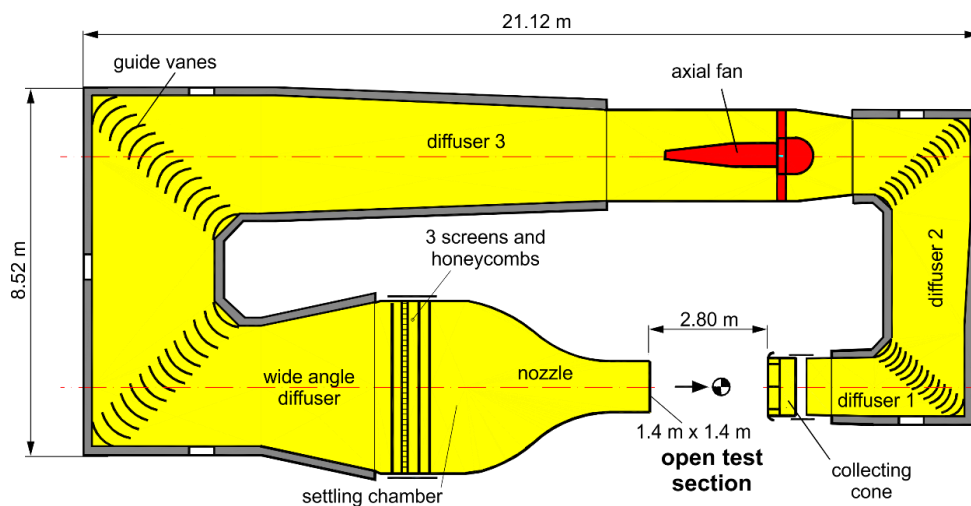


Abb. 3: Großer Windkanal des Lehrstuhls für Meerestechnik

Wie der Abb. 4 entnommen werden kann, befindet sich das Messobjekt oberhalb einer ebenen Platte, 1300 mm hinter der Düse und ist mit einem Drehtisch ($n \times 360^\circ$) verbunden. Oberhalb des Modells, im Bereich der laminaren Anströmung, ist ein Prandtl-Rohr angebracht, an dem der statische Druck als Gegendruck für die im Modell befindlichen Differenzdrucksensoren

abgenommen wird. Zusätzlich wurden in einem andern Versuchsaufbau Hitzdrahtmessungen zur Überprüfung des Geschwindigkeitsprofils im Nachstromfeld der Modelle durchgeführt.

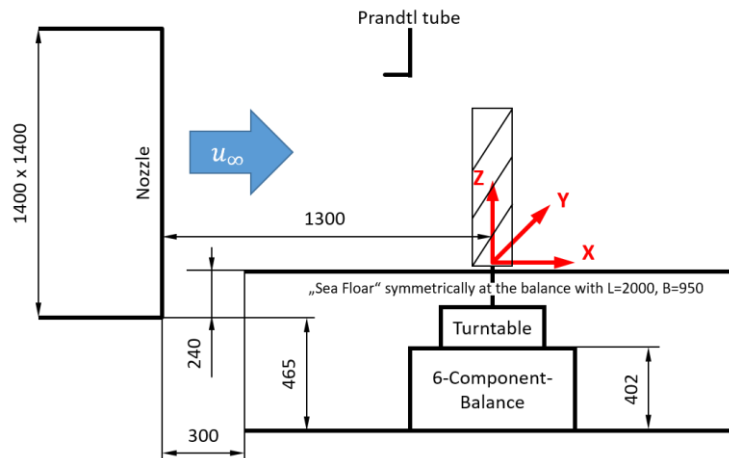


Abb. 4: Skizze der Modelle in der Messstrecke

Ergebnisse

Da laut STENGEL (1968) der Einfluss der Strömungsgeschwindigkeit und damit die Reynoldsabhängigkeit auf geschlagene Seile geringer ist als der Einfluss des Anstellwinkels, wird in dieser Versuchsreihe nur bei einer Geschwindigkeit von $u_\infty = 20 \frac{m}{s}$ gemessen. Dies entspricht einer Reynoldszahl von $Re = 1.29 \cdot 10^5$.

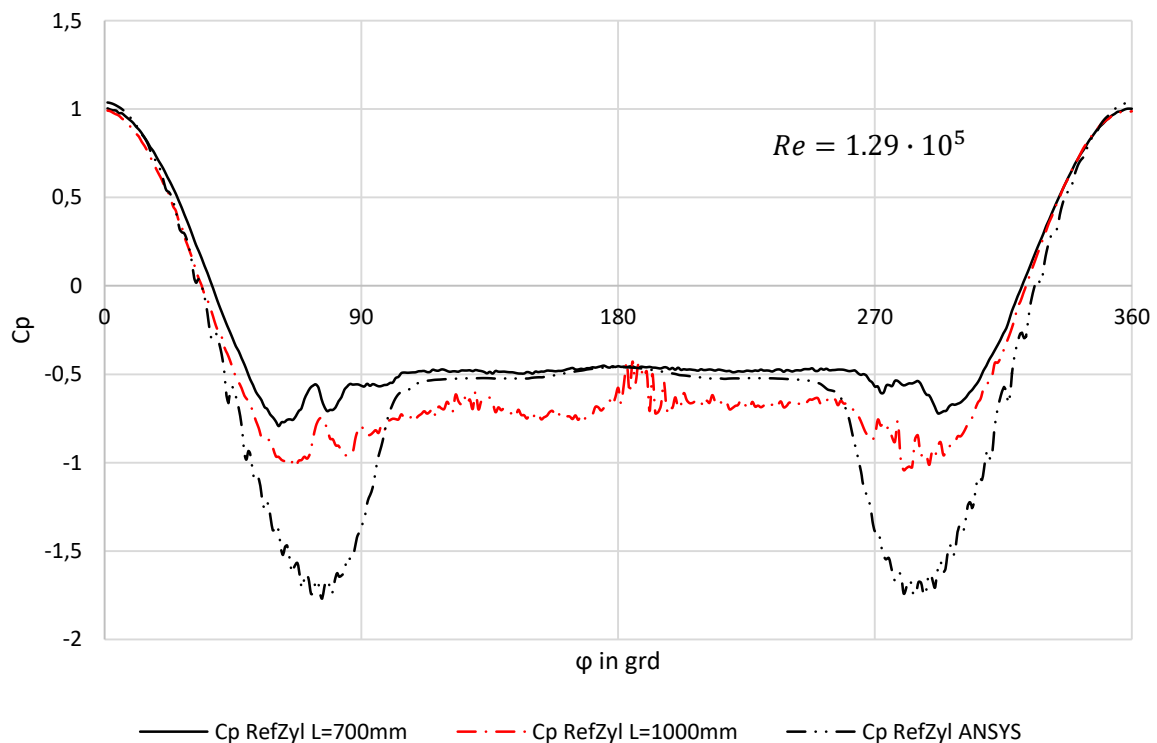


Abb. 5: Experimentelle Ergebnisse der Windkanalversuche an zwei Referenzzylindern unterschiedlicher Länge

Abb. 5 stellt die Ergebnisse der Druckmessung am Referenzzylinder im Windkanal für zwei verschiedene Modelllängen sowie die Ergebnisse aus der numerischen Simulation für einen

unendlich ausgedehnten Referenzzylinder da. Die Messungen erfolgten jeweils in der Mitte der Modelle, um den Einfluss des Randwirbels vom oberen Modellende möglichst gering zu halten. Da bei dem Seilmodell nicht mit einer Endscheibe gearbeitet werden kann, da diese den Nachlauf negativ beeinflussen würde, wurde in diesem Fall ebenfalls auf den Einsatz einer Endscheibe verzichtet. Der Verlauf der Druckbeiwertkurve ist für beide Zylinder ähnlich, jedoch ist deutlich zu erkennen, dass die Werte für den Zylinder mit 1000 mm Länge betragsmäßig größer sind als für den Zylinder mit 700 mm Länge. Die RANS liefert im Gegensatz zum Experiment größere Werte für den Bereich der maximalen Ausdehnung des Zylinders quer zur Anströmung. Dies lässt sich auf verschiedene Ursachen zurückführen. Zum einen wurde im Experiment nicht mit einem unendlichen Modell gearbeitet. Zum anderen kann das Modell im Windkanal technisch bedingt nicht auf beiden Seiten fest eingespannt werden. Dies führt dazu, dass das Modell trotz technischer Maßnahmen zu schwingen beginnt. Das hat wiederum zur Folge, dass an den Messpunkten zusätzliche Geschwindigkeitskomponenten auftreten, die die Messergebnisse negativ beeinflussen. Im Gegensatz dazu bleibt in der Simulation der Körper in Ruhe.

Um den Einfluss der Schwingungen zu minimieren, wurden die experimentellen Ergebnisse über einen Zeitraum von 10 Sekunden gemittelt. Des Weiteren werden die Ergebnisse aus dem Windkanal, bedingt durch den relativ langen Zeitraum, den die Messkampagne in Anspruch nahm, von der Änderung der Umweltdaten beeinflusst. So bewirkt z. B. das Axialgebläse des Windkanals einen Anstieg der Luftstromtemperatur und damit eine Änderung der Dichte des Fluids. Wiederholte Messungen zu unterschiedlichen Zeitpunkten haben aber gezeigt, dass die erzielten Ergebnisse aus dem Versuch reproduzierbar sind.

Aus der obigen Abbildung ist darüber hinaus zu erkennen, dass der Verlauf der Kurven qualitativ gut übereinstimmt. Die Umschlagpunkte zwischen Experiment und Simulation sind nahezu identisch und decken sich mit den Angaben aus der Literatur.

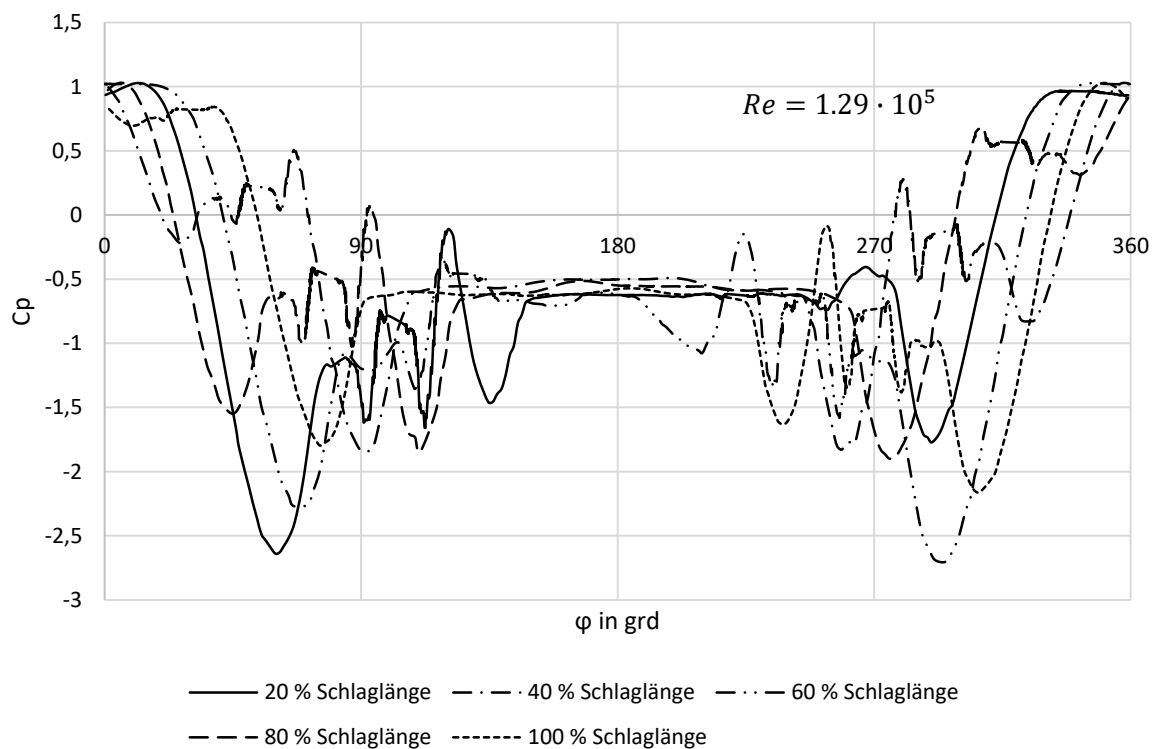


Abb. 6: Druckbeiwerte des Seilmodellquerschnittes aus der numerischen Strömungssimulation bei senkrechter Anströmung $\alpha=0^\circ$ an verschiedenen Positionen

In Abb. 6 ist der Druckbeiwertverlauf bei senkrechter Anströmung ($\alpha = 0^\circ$) für unterschiedliche Höhen über die Schlaglänge dargestellt. Hier wird deutlich, was auch schon die Form vermuten lässt, dass sich die Verteilung über die Höhe verändert. Wie eingangs erwähnt, kann also nicht eine Zirkulation für das gesamte Modell berechnet werden, sondern es muss eine Zirkulationsverteilung ermittelt werden, die eine Funktion der Höhe ist. Da die Litzen im idealisierten Modell punktsymmetrisch sind, ist die dabei zu berücksichtigende Höhe der n -te Anteil einer Schlaglänge. Des Weiteren lässt sich den Kurvenverläufen entnehmen, dass die Strömung auch nach einer bereits erfolgten Ablösung vom Modell kurzzeitig wieder an diesem anlegen kann. Bei einem Vergleich mit dem Ergebnis der Simulation des Referenzzylinders aus Abb. 5 zeigt sich deutlich, dass die Maximalwerte des Seilmodells tendenziell größer sind. Abb. 7 zeigt den Druckbeiwertverlauf über den Seilquerschnitt auf halber Schlaglänge für verschiedene Anströmwinkel. Es ist klar erkennbar, dass mit zunehmendem Anströmwinkel die Beiwertkurve deutlich flacher ausfällt. Außerdem ist festzustellen, dass mit steigendem α der Druckbeiwert auf der einen Seite sinkt und auf der anderen Seite ansteigt.

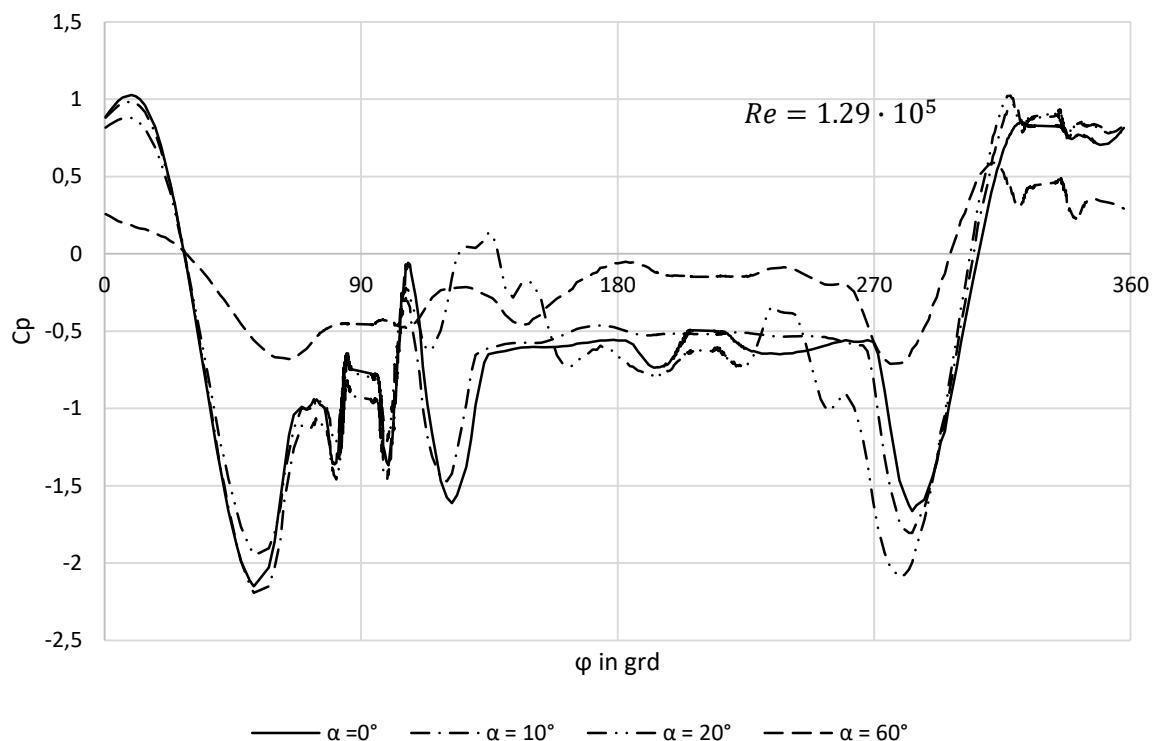


Abb. 7: Druckbeiwerte des Seilmodellquerschnittes aus der numerischen Strömungssimulation bei variierten Anströmwinkel α an der Position halbe Schlaglänge

Ausblick

Die Ergebnisse der numerischen Simulation und der Versuche im Windkanal am Referenzzylindern und deren Gegenüberstellung haben gezeigt, dass der Versuchsaufbau geeignet ist, um Untersuchungen zur Druckverteilung auf der Oberfläche von Strukturen durchzuführen. Dementsprechend kann eine Adaption auf das Seilmodell erfolgen. Es ist zu erwarten, dass die Simulationsergebnisse für das Seilmodell, ähnlich wie beim Referenzzylinder, quantitativ größer ausfallen, die qualitative Aussage aber gleich bleibt. Um dies zu bestätigen, werden in einem nächsten Schritt die zum Teil bereits gewonnenen experimentellen Ergebnisse für das Seilmodell ausgewertet und der Simulation gegenüber gestellt.

Literatur

Breddermann, K. (2017). *Filtration Performance of Plankton Nets used to catch Micro- and Mesozooplankton*. Dissertation, Lehrstuhl für Meerestechnik, Universität Rostock, Rostocker Meerestechnische Reihe (Hrsg. M. Paschen), ISBN 978-3-8440-5405-7.

Eckelmann, H., (1997). *Einführung in die Strömungsmeßtechnik*. Stuttgart, Teubner, ISBN 3-519-02379-2.

Feyrer, K., (2000). *Drahtseile: Bemessung, Betrieb, Sicherheit*. Springer-Verlag.

Hahlbeck, W.-H., (1976). *Die Bewegungsgleichung eines ideal biegsamen, undehnbaren, strömungsbelasteten schweren Fadens bei räumlicher ungleichförmiger Bewegung und ihre Lösung für ein Modell eines pelagischen 1-Schiff-Schleppnetzes*. Dissertation, Universität Rostock.

Püttmann, A., (2016). *Experimentelle Untersuchungen zur Umströmung schlanker Zylinder mit strukturierter Oberfläche*. Masterarbeit, Lehrstuhl für Meerestechnik, Universität Rostock.

Schlichting, H. & Truckenbrodt, E. A., (1967). *Aerodynamik des Flugzeuges: Erster Band: Grundlagen aus der Strömungstechnik. Aerodynamik des Tragflügels*. Springer-Verlag.

Shitkow, D. & Pospelchov, I., (1957). *Drahtseile*. VEB Verlag Technik, S. 190-193.

Stengel, H., (1968). *Beitrag zur Berechnung von Kurrleinenformen und –spannungen*. Dissertation, Universität Rostock.

Wolf, R., (1984). *Zur Beschreibung der vollständigen Seilkinematik*. Forschung im Ingenieurwesen 50, 3, S. 81-86.