Fachtagung "Experimentelle Strömungsmechanik"
3. – 5. September 2019, Erlangen

Numerische und experimentelle Untersuchungen an gedrehten Seilen unter Berücksichtigung ihres hydrodynamischen Verhaltens

S. Schacht, M. Paschen

Universität Rostock, Lehrstuhl für Meerestechnik, Justus-von-Liebig-Weg 2, 18059 Rostock

Zusammenfassung

Es ist bekannt, dass Strömungen eine hydrodynamische Querkraft an verdrillten Seilen induzieren. Diese Querkraft steht senkrecht zu der Ebene, die von der Tangente des Seils und der Strömungsrichtung aufgespannt wird. Seine Wirkungsrichtung ergibt sich aus der Drehrichtung des Seils (z-/ s- Schlag). Die Höhe dieser Kraft hängt offensichtlich vom lokalen Anstellwinkel, der Seilcharakteristik, der Reynoldszahl sowie der Materialart ab.
Wenn es gelingt, diese Kraft gezielt zu erhöhen, könnte dieser Effekt unmittelbar genutzt werden, um die Wirkung z.B. von Scherkörpern beim horizontalen Spreizen von pelagischen Schleppnetzen zu unterstützen und darüber hinaus den hydrodynamischen Widerstand durch Anpassung der Scherkörpergeometrie zu reduzieren.
Im Rahmen einer aktuellen Dissertation wird die Ursache für die Entstehung der strömungsinduzierten Querkraft untersucht. In diesem Kontext scheint der Schlagwinkel des Seils in Kombination mit dem Anstellwinkel von besonderer Bedeutung zu sein. Der methodische Ansatz basiert auf numerischen und experimentellen Analysen der Druckverteilung auf der Oberfläche verdrillter Seilmodelle. Für die Experimente wurde ein geeignetes Messkonzept für Anwendungen vorrangig in Windkanälen entwickelt, erprobt und angewendet.
Ziel des Vortrags ist es, das Konzept zur Ermittlung der Ursache für diese „Querkraft" vorzustellen, sowie die Ergebnisse der numerischen und experimentellen Untersuchungen zu präsentieren und zu diskutieren.

Motivation

Räumlich ausgedehnte Konstruktionen, die aus gedrehten mehrlitzigen Seilen bestehen, sind in verschiedenen meerestechnischen Bereichen, im Brückenbau sowie in anderen landgebundenen Anlagen anzutreffen. In der pelagischen Schleppnetzfischerei wird die Vielzahl möglicher Einsatzbereiche besonders deutlich. So werden sie als Fäden (Kunststofffasern) für Schleppnetzte, umlaufende Verstärkung der Netzöffnung oder in Form von Kurrleinen (Stahldraht), welche die Verbindung zwischen dem Trawler und dem Schleppnetz darstellen, verwendet. Gedrehte Seile lassen sich nach ihrer Schlagrichtung differenzieren. Im Gegensatz zu homogen kreiszylindrisch geformten Seilen, so genannten Kernmantelseilen, treten bei gedrehten Seilen in Abhängigkeit der Schlagrichtung (z-Schlag und s-Schlag) bei Anströmung konstant in eine Richtung wirkende Querkräfte auf. Diese Querkräfte bewirken eine Auslenkung des Seils, da es auf Grund seiner hohen Biegsamkeit weder Querkräfte aufnehmen noch Biegemomente übertragen kann. Gerade in Hinblick auf Kurrleinen und den daran befestigten Scherkörpern ist es sinnvoll, diesen Effekt der strömungsinduzierten Auslenkung zu nutzen. Scherkörper werden in der Fischereitechnik verwendet. Sie sind als dün-

Copyright © 2019 and published by German Association for Laser Anemometry
GALA e.V., Karlsruhe, Germany, ISBN 978-3-9816764-6-4

ne, aufrecht angeordnete Tragflügel ausgeführt, um Schleppnetze in der Horizontalen zu öffnen. Sie sind so konzipiert, dass sie einen möglichst großen hydrodynamischen Auftrieb besitzen, um die erforderliche horizontale Querkraft erzeugen zu können. Gleichzeitig steigt jedoch der hydrodynamische Widerstand. Es gibt bereits in der russischen Fischerei Bestrebungen, die durch die zum Teil mehrere Kilometer langen Kurrleinen erzeugte Querkraft gezielt Spreizung pelagischer Schleppnetze einzusetzen, um damit die Scherkörper kleiner dimensionieren und dadurch deren Widerstand zu reduzieren. Dies wiederum ruft eine Reduktion des Gesamtwiderstands des Fanggeschirrs hervor was sich positiv auf die ökologische als auch die ökonomische Bilanz auswirkt.

Modell

In SCHACHT (2018) wurde das den numerischen und experimentellen Untersuchungen zu Grunde liegende Modell eingehend vorgestellt, so dass hier nur ein kurzer Abriss erfolgt. Bei den untersuchten Seilmodellen handelt es sich um einen Kreiszylinder und ein dreikardeelig geschlagenes Seile mit identischem Außendurchmesser. Beide Objekte wurden numerisch mit ANSYS CFX sowie experimentell im Niedergeschwindigkeitswindkanal Göttinger Bauart des Lehrstuhls für Meerestechnik untersucht. Dabei lag der Schwerpunkt auf der Identifikation der Druckverteilung an der Modelloberfläche über eine volle Schlaglänge[1]. Um eine bessere Vergleichbarkeit der Ergebnisse der Modelle untereinander und zwischen Simulation und Experiment zu erreichen, wurde der dimensionslose Druckbeiwert

$$c_p = \frac{p - p_\infty}{\rho/2 \cdot {u_\infty}^2}$$

herangezogen. Die Anströmgeschwindigkeit wurde auf $u_\infty = 20\ {}^{m}/_{s}$ festgesetzt; dies entspricht für die Modelle einer Reynoldszahl von $Re \approx 1.3 \cdot 10^5$.

Messsystem

Für die Druckmessungen im Windkanal wurden digitale Drucksensoren des Typs AMS 5915 mit I2C-Schnittstelle für einen Niederdruckbereich von $\pm 2\ kPa$ eingesetzt. Tabelle 1 zeigt einige vom Hersteller angegebene Eigenschaften der Sensoren. So liegt unter anderem die Reaktionszeit für den Sensor bei $2kHz$ und die Druckmessgenauigkeit bei $\pm 1{,}0\ \%FSO$ (Full Span Output).

Tabelle 1: Werte und Eigenschaften der verwendeten Drucksensoren AMS 5915 nach ASM 5915 (2015)

Parameter	Wert	Einheit	Bemerkung
Messbereich	± 2	kPa	
Genauigkeit Druckmessung	± 1.0	$\%FSO$	$T = 25$°C
Gesamtfehler Druckmessung	± 1.5	$\%FSO$	$T = -25 \ldots 85$°C
Gesamtmessung Temperaturmessung	± 3.0	$\%FSO$	$T = -25 \ldots 85$°C
Reaktionszeit	0.5	ms	

Da die Wirbelablösefrequenz für dreikardeelig geschlagene Seile nicht bekannt ist, wird die Frequenz des Kreiszylinders als Richtwert angesetzt. Der Literatur kann für eine Reynolds-

[1] Eine Schlaglänge bezeichnet die Länge, die für eine komplette Windung einer Litze um die Seileinlage notwendig ist.

Copyright © 2019 and published by German Association for Laser Anemometry
GALA e.V., Karlsruhe, Germany, ISBN 978-3-9816764-6-4

zahl von $Re \approx 1.3 \cdot 10^5$ für glatte Kreiszylinder eine Strouhalzahl von $Sr \approx 0.3$ entnommen werden. Aus der Gleichung für die Strouhalzahl

$$Sr = \frac{d_0 f_0}{u_\infty}$$

ergibt sich im Umkehrschluss bei einem Außendurchmesser von $d_0 = 0.11m$ eine Wirbelablösefrequenz von $f_0 \approx 55Hz$, die zusätzlich mit dem Nyquist-Kriterium beaufschlagt wird. Es stellt sich heraus, dass der gewählte Drucksensor ausreichend empfindlich ist, um die Ablösefrequenz ermitteln zu können. Bei den Sensoren handelt es sich um bidirektionale Differenzdrucksensoren. Die beiden Drücke p_1 und p_2 werden jeweils über einen Anschlussstutzen auf eine Membran geführt. Ein Stutzen ist im Rahmen der Untersuchungen mit einem in der ungestörten Anströmung befindlichen Prandtl-Rohr und der andere mit einer Messbohrung im Modell verbunden. Die Membran weist ein symmetrisches Verhalten bezüglich der Auslenkung auf. Bidirektional bedeutet hier, das sowohl der Fall $p_1 \leq p_2$ als auch $p_1 \geq p_2$ eintreten kann.

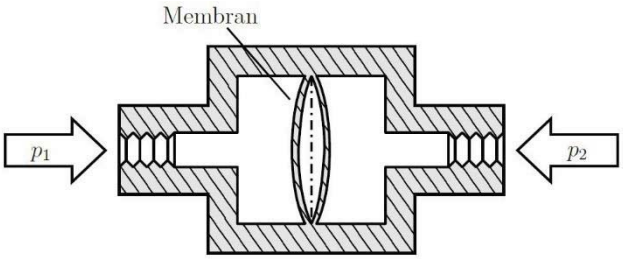

Abb. 1: Bidirektionale Differenzdruckmessung

Die Drucksensoren sind zusammen mit einem Luftfeuchtigkeitssensor (SHT 21) und einem Luftdrucksensor (BMP 280) auf einer Platine untergebracht, welche wiederum mit einem Arduino Mega verbunden ist (siehe Abb. 2). Der SHT 21 und der BMP 280 liefern alle notwendigen Umweltdaten, um unter anderem die Dichte des Fluids nach PICARD (2008) zu berechnen.

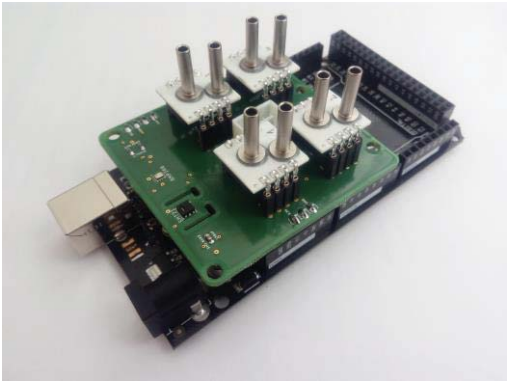

Abb. 2: Messsystem mit 4 x AMS 5915 und BMP 280 sowie SHT 21

Numerische und experimentelle Ergebnisse

Die klassische Darstellungsweise des Druckbeiwertes c_p über den Querschnitt, wie in Abb. 3 für die numerischen Ergebnisse bei ebener Umströmung des Kreiszylinders dargestellt, ist für Körper mit unregelmäßiger Oberflächenstruktur wie z.B. gedrehte Seile auf Grund der räumlich angeordneten Strömung ungeeignet. Die Umströmung bei gedrehten Seilen verhält

Copyright © 2019 and published by German Association for Laser Anemometry
GALA e.V., Karlsruhe, Germany, ISBN 978-3-9816764-6-4

sich in den unmittelbar benachbarten Abschnitten anders als bei der ebenen Umströmung eines Kreiszylinders, wie der Abb. 3 entnommen werden kann. Um einen besseren Überblick der Verteilung des Druckbeiwerts über eine gesamte Schlaglänge L zu erhalten, wird dieser in einem Polardiagramm (Abb. 4) dargestellt.

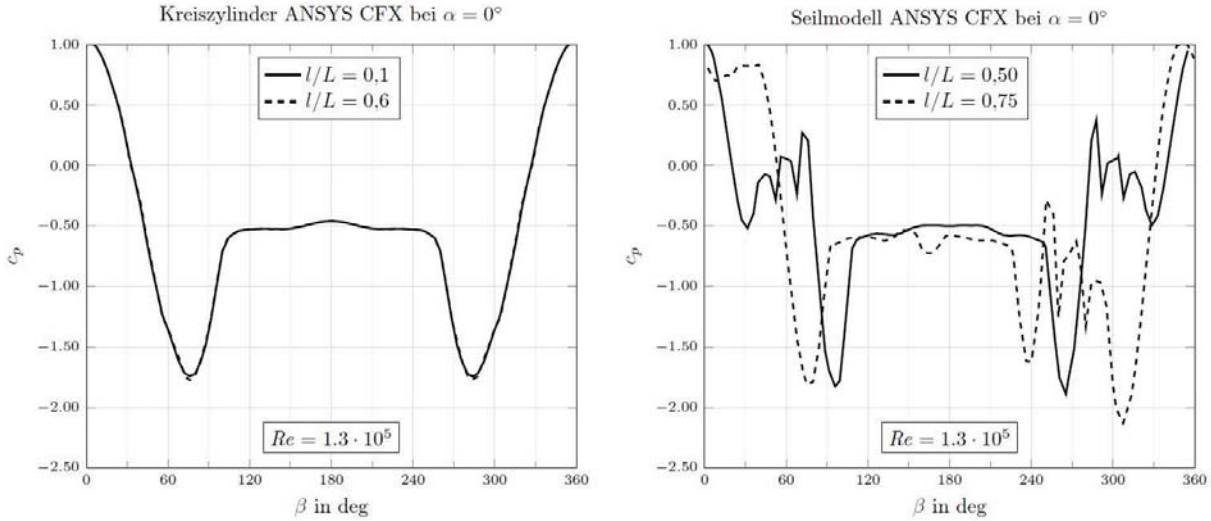

Abb. 3: Verteilung des Druckbeiwerts über Kreiszylinderquerschnitt (l.) und Seilquerschnitt (r.)

Das Polardiagramm in Abb. 4 zeigt farblich dargestellt den Druckbeiwert über den Querschnitt. Die konzentrischen Ringe geben die entsprechende Schnittebene l/L des Körpers wieder. Aufgetragen ist c_p über den umlaufenden Umfangswinkel β, wobei sich bei $\beta = 0^{\circ}$ der Staupunkt befindet. Des Weiteren kann der Abbildung die zugrunde liegende Reynoldszahl und der Anströmwinkel α entnommen werden.

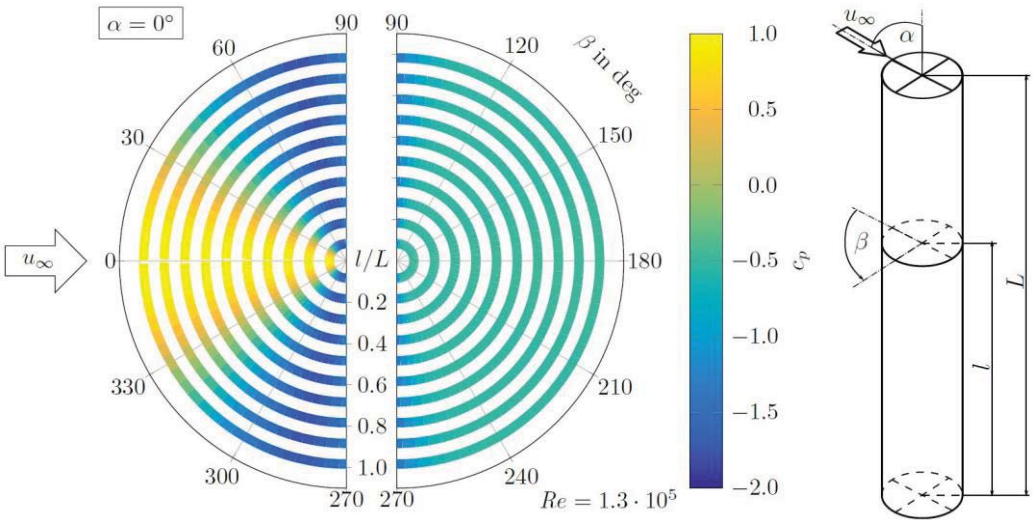

Abb. 4: Druckbeiwert für Kreiszylinder über die volle Modellhöhe (l.), Kreiszylinder l/L

In dieser Abbildung ist das numerische Ergebnis für den Kreiszylinder dargestellt. Der Druckbeiwert entspricht dem aus der Literatur erwarteten Verlauf über den Querschnitt und ist für jeden Abschnitt l/L identisch. Anders verhält es sich bei dem dreikardeelig gedrehten Seil, wie der Abb. 5 entnommen werden kann. Hierbei handelt es sich um die numerischen Ergebnisse aus ANSYS CFX. Gewählt wurden exemplarisch die Ergebnisse bei einem Anströmwinkel von 0° und 20°. Für die bessere Vergleichbarkeit ist der Wertebereich der Skala für den Druckbeiwert in beiden Fällen identisch. Deutlich zu erkennen ist der Unterschied zwischen Seil und Zylinder für $\alpha = 0^{\circ}$ bei der Verteilung des Druckbeiwertes über den Quer-

Copyright © 2019 and published by German Association for Laser Anemometry
GALA e.V., Karlsruhe, Germany, ISBN 978-3-9816764-6-4

schnitt. Während die Verteilung beim Kreiszylinder für alle l/L symmetrisch zur Achse der Anströmung ist, wirkt sie auf dem ersten Blick beim Seil sehr unstrukturiert. Bei näherer Betrachtung wird aber deutlich, dass sich immer nach einem Drittel der Schlaglänge die Ergebnisse wiederholen. Dies korreliert mit der Anzahl der Litzen, so dass sich die Aussage wie folgt verallgemeinern lässt: Bei geschlagenen Seilen wiederholt sich der Druckverlauf auf der Querschnittsfläche über die Schlaglänge in Abhängigkeit der Litzenanzahl n_L nach $1/n_L$ Schlaglängen.

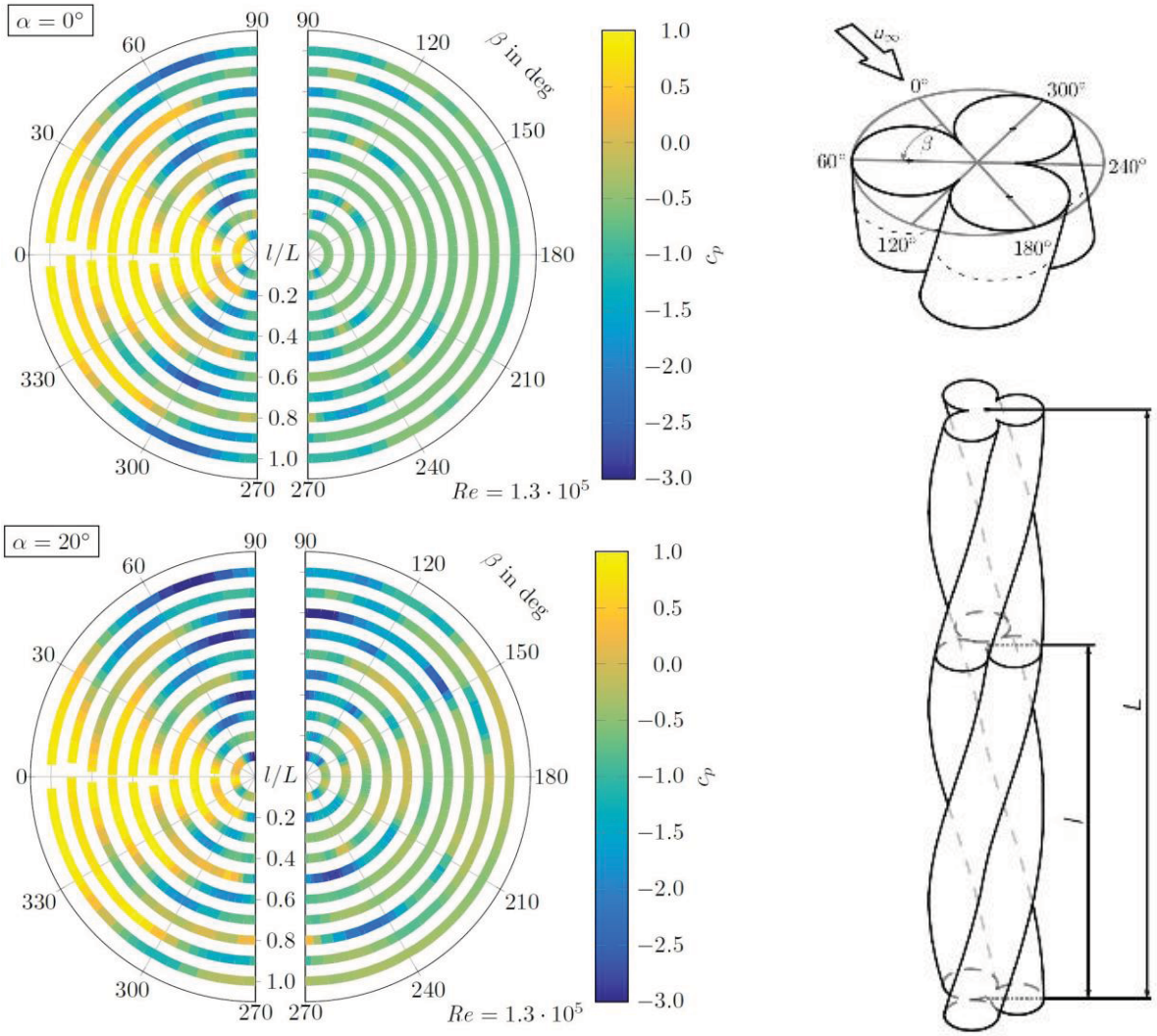

Abb. 5: Verteilung des Druckbeiwerts für das Seilmodell aus ANSYS CFX für $\alpha = 0^\circ$ (l.) und $\alpha = 20^\circ$ (r.)

Bei einem Vergleich der beiden Polardiagramme miteinander ist deutlich die Zunahme des Unterdruckgebietes bei größerem Anströmwinkel zu erkennen. Des Weiteren wird deutlich, dass das Unterdruckgebiet im Gegensatz zum Kreiszylinder vor allem auf einer Objektseite stark ausgeprägt ist. Hieraus lässt sich ableiten, dass zusätzlich zu einer Widerstandskraft eine Querkraft entsteht. Dies wird auch von den Untersuchungen zu den Kraftbeiwerten von geschlagenen Seilen von STENGEL (1968) bestätigt.
Wie Abb. 6 zeigt, werden die numerischen Ergebnisse des Seilmodells von den experimentellen Untersuchungen am identischen Seilmodell im Windkanal bestätigt. Aus den Ergebnissen wird außerdem ersichtlich, dass mit zunehmenden Anströmwinkel das ausgelenkte Unterdruckgebiet stetig steigt (ca. $\alpha = 15^\circ$ bis $\alpha = 20^\circ$), bis das es bei $\alpha = 25^\circ$ wieder deutlich

Copyright © 2019 and published by German Association for Laser Anemometry
GALA e.V., Karlsruhe, Germany, ISBN 978-3-9816764-6-4

abnimmt. Ob dies mit dem Schlagwinkel korreliert werden nachfolgende Untersuchungen zeigen.

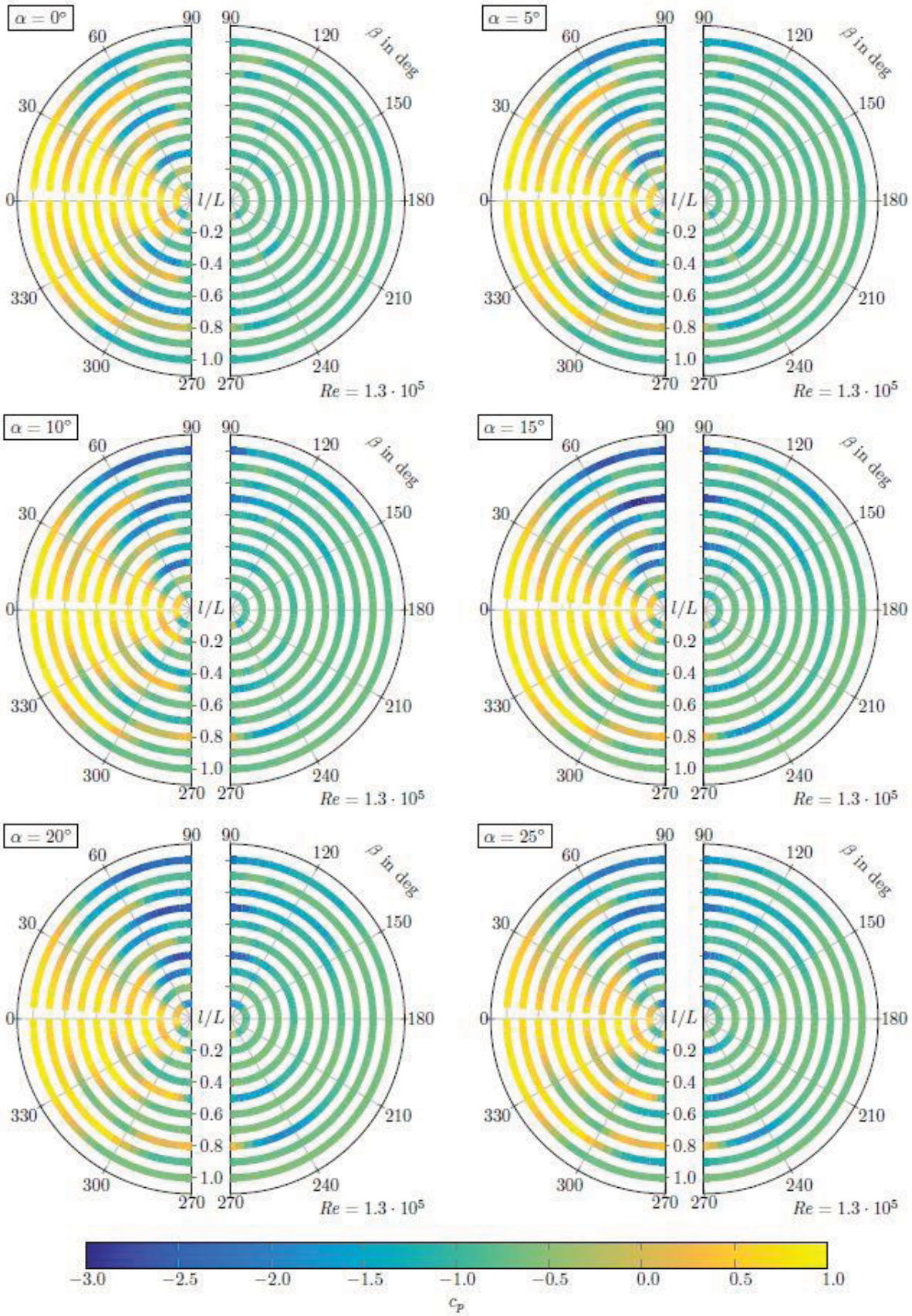

Abb. 6: Verteilung des Druckbeiwerts über eine Schlaglänge für das Seilmodell im Windkanal

Copyright © 2019 and published by German Association for Laser Anemometry
GALA e.V., Karlsruhe, Germany, ISBN 978-3-9816764-6-4

Fazit

Es hat sich gezeigt, dass das entwickelte Messsystem geeignet ist, die Druckverteilung auf der Oberfläche von Versuchsobjekten zu messen. Das Messsystem lässt sich auf beliebige Anwendungen im Medium Luft adaptieren und einfach in jedes Objekt, direkt am Messpunkt integrieren. Die Untersuchungsergebnisse an einem Kreiszylinder und einem gedrehten Seil machen die Verschiedenartigkeit der Umströmung deutlich, die es bei speziellen Anwendungen zu berücksichtigen gilt. Bei numerischen Simulationen werden, um die Rechenzeiten und den Vernetzungsaufwand zu minimieren, gedrehte Seile im Regelfall durch Zylinder approximiert. Die Untersuchungen haben jedoch gezeigt, dass diese Vereinfachung nicht ohne weiteres zulässig ist. Die voneinander abweichende Druckverteilung wirkt sich nicht nur auf die resultierende Strömungsbelastung von Zylinder und Seil aus, sie führt auch zu unterschiedlichen Nachstromfeldern.

Literatur

AMS 5915, (2015). *Amplified pressure sensor with digital output (I2C),* Data Sheet, Analog Microelectronics GmbH.

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.

Picard, A., et al. (2008).*Revised formula for the density of moist air (CIPM-2007)*.Metrologia, 45. Jg., Nr. 2, S. 149.

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

Schacht, S. & Paschen, M., (2018).*Analyse von hydrodynamischen Querkräften an dreikardeelig geschlagenen Seilen.*Proceedings der 26. GALA-Fachtagung "Experimentelle Strömungsmechanik", 4. - 6. September 2018, Rostock, Hrsg.: Grundmann, S.; Brede, M.; Ruck, B.; Leder, A.; Dopheide, D., ISBN 978-3-9816764-5-7, ISSN 2194-2447.

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

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

Copyright © 2019 and published by German Association for Laser Anemometry
GALA e.V., Karlsruhe, Germany, ISBN 978-3-9816764-6-4