

Umströmung von Zylindern mit leeseitiger, poröser Ummantelung

Flow around cylinders with porous coating on their leeward side

K. Wacker, B. Ruck

Laboratorium für Gebäude- und Umweltaerodynamik, Institut für Hydromechanik, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Kaiserstraße 12, 76131 Karlsruhe, Germany

Zylinderumströmung, poröse Beschichtung, Particle Image Velocimetry (PIV)
Flow around circular cylinders, porous coating, particle image velocimetry (PIV)

Zusammenfassung

Systematische Strömungsfeldmessungen wurden im Windkanal für leeseitig, porös ummantelte Kreiszyylinder durchgeführt. Die Messungen erfolgten im unterkritischen Reynolds-Bereich für $Re = 3 \times 10^4$. Den positiven Effekt von leeseitigen porösen Schichten als passive Kontrollmethode zeigten bereits vorherige Untersuchungen, die als Resultat eine Widerstandsreduktion aufzeigten. Die Strömungsfeldanalyse zeigt eine Abnahme der kinetischen Energie und der Geschwindigkeitsfluktuationen im Nachlauf des Zylinders. Diese Abnahme ist umso größer, je größer der Ummantelungswinkel ist. Die Ursache ist, dass das Aufrollen der Scherschicht bzw. der Wirbelbildungsprozess weiter stromab stattfindet. Verantwortlich dafür ist der Mechanismus des Hoch- und Herunterlaufens des Primärwirbels. Dieser wird durch die leeseitige poröse Schicht gestört bzw. kommt dadurch nicht an der Zylinderleeseite zustande.

Einleitung

Das Strömungsfeld um Kreiszyylinder kann auf verschiedene Weise beeinflusst werden. Hierbei wird prinzipiell zwischen aktiven und passiven Kontrollmethoden unterschieden. Bei ersterer Variante wird aktiv Energie in das System eingebracht, während bei den passiven Methoden die Strömungskontrolle mit Hilfe von eingebauten Elementen, wie beispielsweise Stolperdrähte, „dimples“, Rauigkeiten und permeablen Ummantelungen (siehe Fage und Warsap 1929, Bearman und Harvey 1993, Achenbach 1971, Price 1956, Wong 1979, Galbraith 1981) erfolgt.

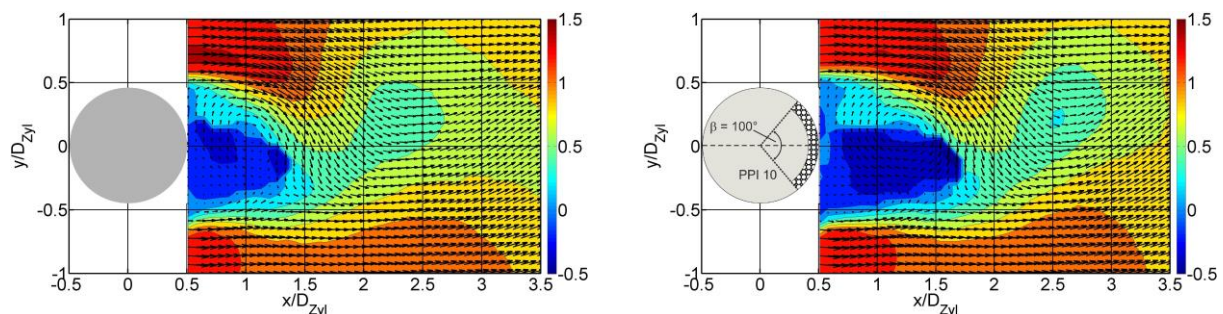


Abb. 1: Isotachenwerte (Konturplot) und Geschwindigkeitsvektoren (schwarze Pfeile) für den glatten Zylinder (links) und den leeseitig porös ummantelten Zylinder (rechts) bei einem Phasenwinkel von $\psi = 135^\circ$.

Solche passive Methoden reduzieren zum Beispiel Widerstandskräfte und dämpfen Schwingungen.

Naito und Fukagata 2012 und Sueki 2010 zeigen in ihren Untersuchungen von vollständig ummantelten Zylindern mit porösem Material, dass das Wirbelablösen unterdrückt wird und sich die Strömungsgeräusche reduzieren.

Bislang ist der Effekt einer ausschließlich leeseitigen Anordnung einer dünnen, dreidimensionalen, porösen Schicht noch nicht vollständig strömungsphänomenologisch aufgeklärt und verstanden.

Die im Rahmen dieses Beitrags vorgestellten Ergebnisse entstanden in einem Forschungsprojekt, bei dem es um die Widerstandsminderung von Zylindern geht, deren Leeseite mit einer porösen, permeablen, dünnen Schicht versehen wurde. Die bereits gewonnenen Ergebnisse des positiven Effekts der Widerstandsreduktion bei leeseitig, porös ummantelten Zylindern wurden mit neu generierten Geschwindigkeitsdaten erweitert. Diese wurden aus experimentellen Windkanaluntersuchungen gewonnen und liefern somit Detailinformationen über das Strömungsfeld, siehe Abb. 1.

Experimenteller Aufbau

Die Strömungsfeldanalyse erfolgte mit Hilfe eines zeitlich hochaufgelösten TR-PIV Messsystems der Firma Dantec. Die Auflösung der Hochgeschwindigkeitskamera beträgt 1280x800 Pixel. Die Messungen wurden mit einer Anströmgeschwindigkeit von $u = 6 \text{ m/s}$ durchgeführt. Pro Messreihe wurden 5000 Doppelbildpaare aufgenommen. Mit Hilfe der adaptiven Korrelation wurden die Partikelbilder evaluiert. Die finale Größe der Abtastfenster lag bei 32x32 Pixeln und 50% Überlappung. Mit Hilfe der „universal outlier detection“ wurden sogenannte Ausreißervektoren aufgespürt, eliminiert und mittels Medianwert der umgebenen Nachbarvektoren ersetzt. Zur Analyse der Scherschicht und der sich ablösenden Wirbel wurde die Messebene so gewählt, dass sich die Scherschicht und die Wirbelzone im Zentrum des Bildes befanden. Die Abmessung der Messebene I betrug $300 \times 185 \text{ mm}$, die Abmessung der Messebene II betrug $388 \times 240 \text{ mm}$. Die Abtastfrequenz betrug 1kHz.

Der Lichtschnitt befand sich in der Mitte des Zylinders, siehe Abb. 2. Um die optische Zugänglichkeit und eine zweidimensionale Umströmung zu gewährleisten, wurde der Zylinder zwischen der Kanalwand und einer „splitter plate“ in den Windkanal eingebaut, siehe Abb. 2.

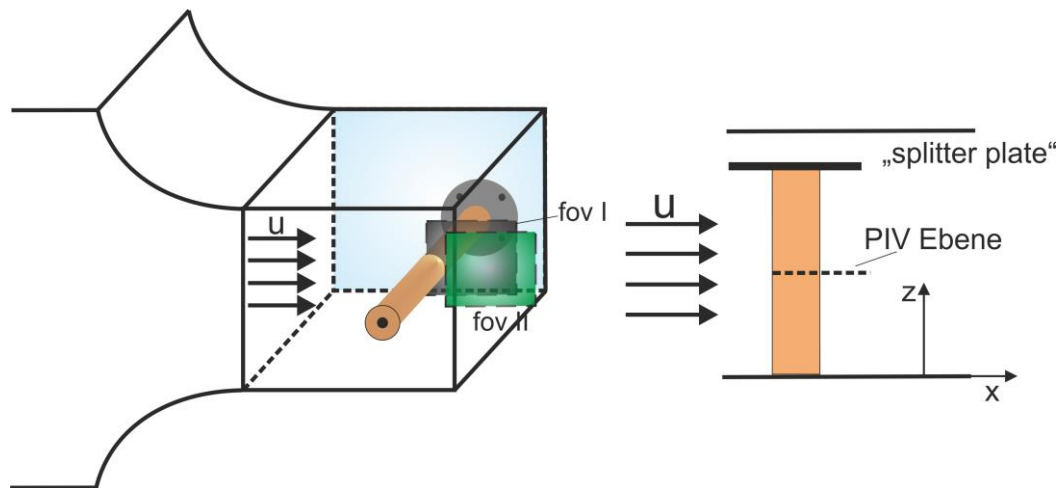


Abb. 2: Messebene I und II (fov I und fov II) in der Mitte des Zylinders

Zylindermodelle

Neben dem glatten Referenzzylinder wurden Konfigurationen mit einer konstanten leeseitigen porösen Schicht von $d_M = 10 \text{ mm}$, siehe Abb. 3, untersucht. Die poröse Schicht besteht aus Polyurethan-Schaumstoff mit der Porosität PPI 10 („pores per inch“). Variiert wurde der Ummantelungswinkel mit $\beta = 40^\circ$ und $\beta = 100^\circ$, siehe Abb. 3.

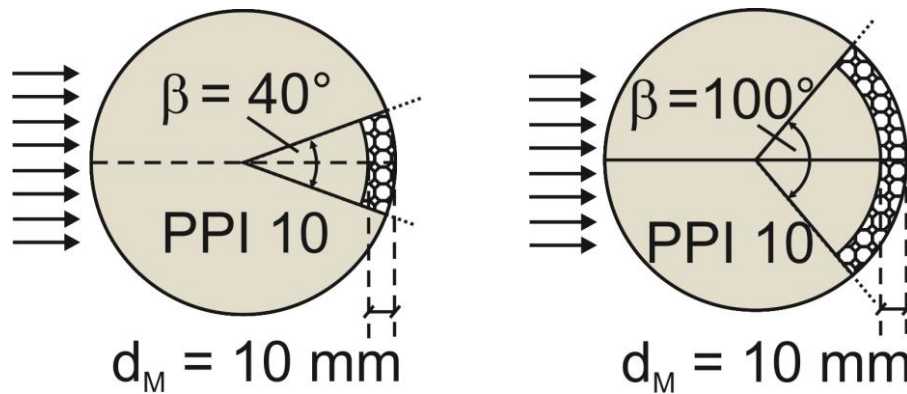


Abb. 3: Zylinderkonfigurationen mit variierendem Ummantelungswinkel und einer konstanten Schichtstärke von $d_M = 10$ mm.

Ergebnisse

Zeitlich gemittelte Geschwindigkeitsfelder

Die Druckverteilungen aus vorherigen Untersuchungen haben für den glatten Zylinder und den leeseitig, porös ummantelten Zylinder ähnliche Strömungsablöseregionen aufgezeigt. Daraus resultiert, dass sich ein nahezu gleiches Strömungsfeld stromauf des Ablösebereichs für beide Konfigurationen ausbildet. Die Grenzschicht ist jeweils laminar. Zdravkovich 1997 gibt einen Überblick über die Übergangsbereiche der drei unterteilten Zonen im Strömungsfeld um einen Kreiszyylinder (Nachlaufzone, Scherschicht, Grenzschicht) mit größer werdender Reynolds-Zahl. Im unterkritischen Reynolds-Bereich ist der Nachlauf turbulent und der laminar-turbulente Übergang findet in den Scherschichten statt. Aufgrund der glatten Luvseite der Zylindermodelle und des sich dort ähnlich ausbildenden Strömungsfeldes, liegt der Fokus dieser Arbeit auf dem Nachlauf und den Scherschichten.

In Abb. 4 – 8 sind die zeitlich gemittelten Ergebnisse der PIV-Messungen bei einer Reynolds-Zahl von $Re = 3 \times 10^4$ dargestellt. Die Daten wurden mit der Anströmgeschwindigkeit $u_\infty = 6$ m/s normiert.

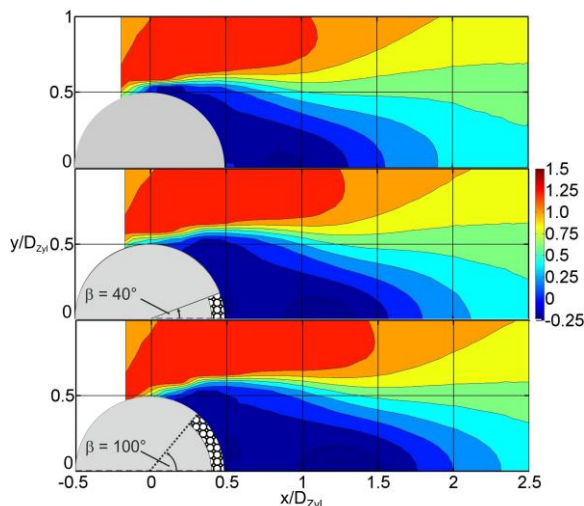


Abb. 4a: Horizontale Strömungskomponente \bar{u}

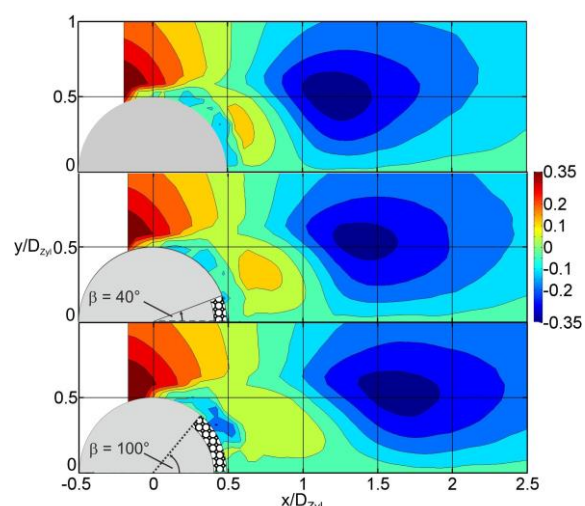


Abb. 4b: Vertikale Strömungskomponente \bar{v}

Abb. 4: Zeitlich gemittelte Strömungskomponenten

Abb. 4a und 4b illustrieren, dass sich das Gebiet mit niedrigen Geschwindigkeiten bei zunehmendem Ummantelungswinkel in Hauptströmungsrichtung vergrößert. Für größer werdende Ummantelungswinkel kragt der Geschwindigkeitsbereich außerhalb der Scherschicht

weiter in den Nachlauf aus und die vertikalen Strömungskomponenten sind weiter nach stromab verschoben. Dies zeigt, dass das Aufrollen der Scherschicht bzw. der Wirbelbildungsprozess weiter stromab stattfindet.

In Abb. 5a ist die turbulente kinetische Energie k dargestellt. Hier zeigt sich, dass die leeseitige poröse Schicht die turbulente kinetische Energie in der Scherschicht reduziert. Die Reduktion wird mit zunehmendem Ummantelungswinkel größer. Im Nachlauf ist ebenfalls ein deutlicher Unterschied im Vergleich zum glatten Referenzzylinder erkennbar. Die maximale turbulente kinetische Energie nimmt von $k = 0,5$ (glatter Referenzzylinder) auf $k = 0,4$ (Konfiguration $\beta = 100^\circ$) ab und auch hier ist der Trend zu erkennen, dass sich mit zunehmendem Ummantelungswinkel die turbulente kinetische Energie verringert.

In Abb. 5b ist die Reynolds-Schubspannungskomponente $\overline{u'v'}$ dargestellt. Hier ist ebenfalls eine Verschiebung von charakteristischen Strömungsstrukturen nach stromab mit größer werdendem Ummantelungswinkel ersichtlich. Außerdem ist eine deutliche Reduktion der Schubspannungen erkennbar.

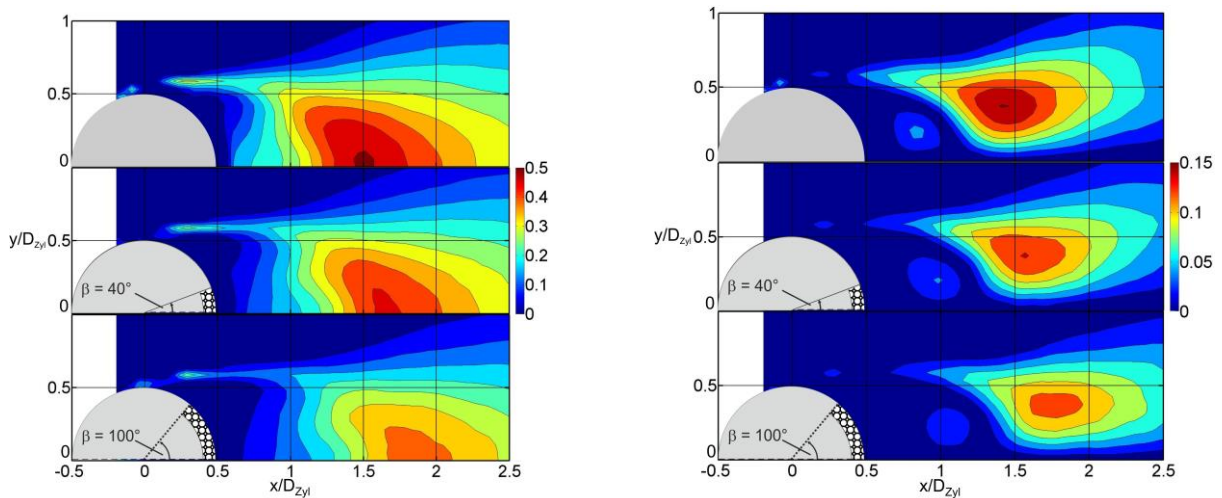


Abb. 5a: $k = \frac{3}{4} \cdot (\overline{u'^2} + \overline{v'^2})$

Abb. 5b: $\tau_{corr} = \overline{u'v'}$

Abb. 5: Turbulente kinetische Energie und Reynolds-Schubspannungskomponente

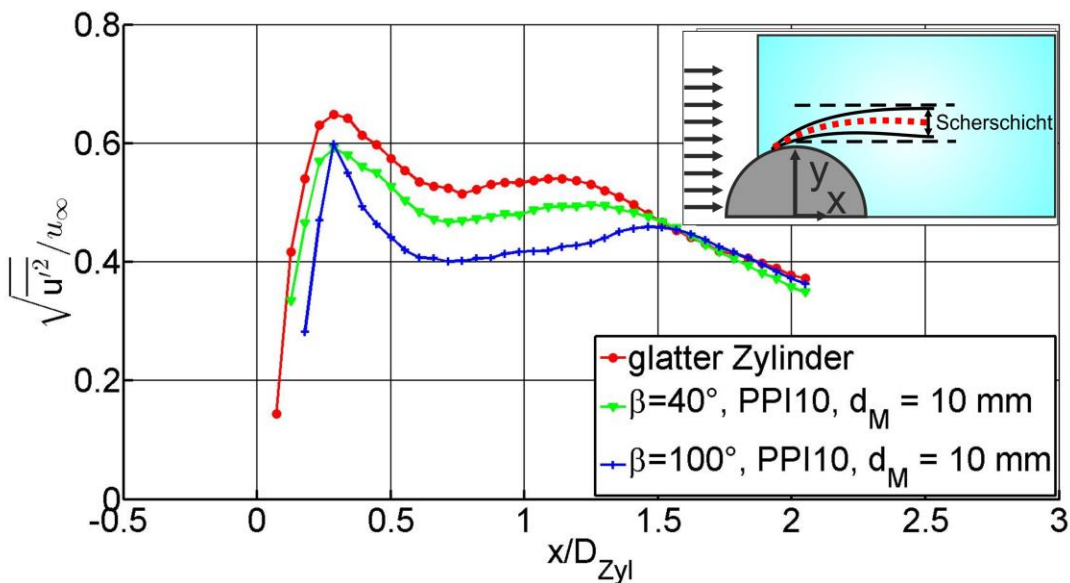


Abb. 6: Maximale Standardabweichung der horizontalen Strömungskomponente innerhalb der Scherschicht.

In Abb. 6 ist die maximale Standardabweichung der horizontalen Strömungskomponente über dem Abstand x/D_{Zyl} dargestellt. Die Werte stammen aus dem Bereich innerhalb der Scherschicht. In dieser Abbildung wird die Variation des Ummantelungswinkels β im Vergleich zum glatten Zylinder bei konstanter Schichtstärke ($d_M = 10$ mm) und konstantem PPI 10 Schaumstoff aufgezeigt. Es zeigt sich, je größer der Winkel ist, desto geringer sind die maximalen Standardabweichungen. Interessant ist hierbei der Verlauf. Für $0 < x/D_{Zyl} < 0,29$ ist die Entwicklung aller Kurven nahezu identisch. Alle drei Kurven besitzen annähernd dieselbe Steigung. Bei einem Winkel von $\beta = 40^\circ$ ist der Kurvenanstieg nur geringfügig unterhalb des Verlaufs des Referenzzylinders. Das Maximum befindet sich bei allen Konfigurationen an der Stelle $x/D_{Zyl} = 0,29$.

Die Abweichung des Maximums zum Referenzfall kann für beide Zylinder mit leeseitiger poröser Schicht zwischen 7,6% ($\beta = 100^\circ$) und 8,7% ($\beta = 40^\circ$) angegeben werden.

An der Stelle $x/D_{Zyl} = 0,32$ und somit unmittelbar nach der Stelle des maximalen Peaks ($x/D_{Zyl} = 0,29$) beginnt die in die Oberfläche integrierte poröse Schicht auf der Leeseite bei der Konfiguration mit einem Ummantelungswinkel von $\beta = 100^\circ$. Es wird deutlich, dass die 10 mm dicke poröse Schicht für den steileren Abfall der Kurve verantwortlich ist. Bei dem kleineren Ummantelungswinkel ($\beta = 40^\circ$) verläuft der Abfall der Kurve für $\beta = 40^\circ$ nach dem Maximum weniger steil. Insgesamt ist die Form der Kurve sehr ähnlich zum Verlauf des Referenzzylinders. Nach dem Peak fallen alle Kurven jeweils auf ein Minimum-Plateau ab. Es kann gezeigt werden, dass sich dieses Plateau der maximalen Standardabweichung der horizontalen Strömungskomponente reduziert, je größer der Ummantelungswinkel ist.

Eine 10 mm dicke poröse Schicht mit dem Schaumstoff PPI 10 bewirkt bei einem symmetrischen leeseitigen Winkel von $\beta = 100^\circ$ (die Symmetrie bezieht sich auf die horizontale Linie durch den Staupunkt) eine Reduktion der maximalen Standardabweichung der u - Komponente innerhalb der Scherschicht von bis zu 24,2%.

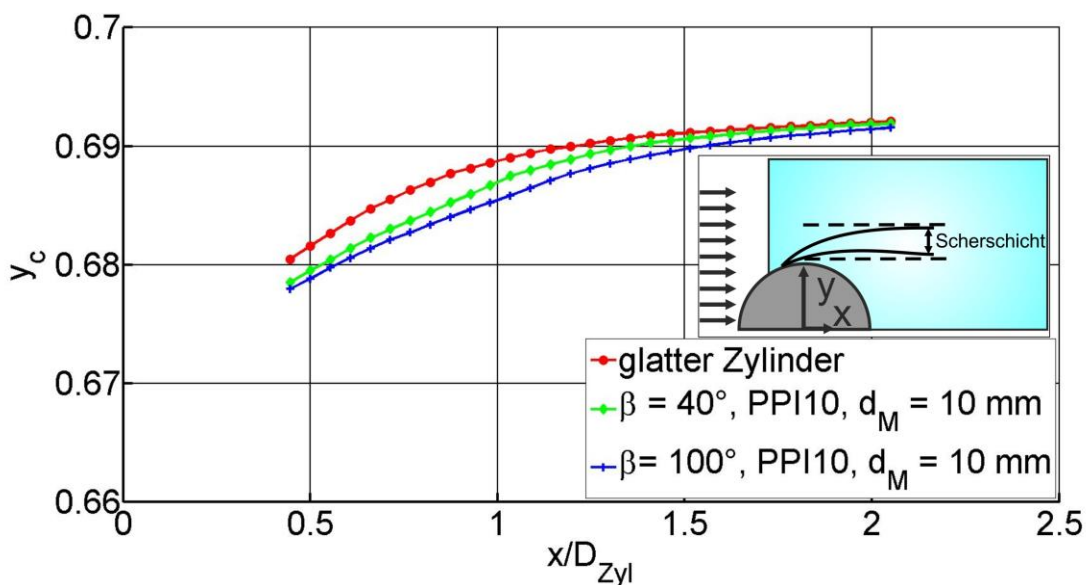


Abb. 7: Zeitlich gemittelte Scherschichtkontur, mit $y_c = (d\bar{U} / dy)_{\max}$.

In Abb. 7 wird die zeitlich gemittelte Scherschichtkontur y_c dargestellt. Es zeigt sich, dass die Breite des Nachlaufs vom Ummantelungswinkel abhängig ist. Je größer der Winkel ist, desto schmaler wird die Nachlaufbreite.

In Abb. 8 werden die Standardabweichungen der vertikalen Geschwindigkeitskomponenten im Nachlauf auf der Mittelachse ($y/D_{Zyl} = 0$) illustriert. Es ist deutlich sichtbar, dass sich mit größer werdendem Ummantelungswinkel die Schwankungen im Nachlauf reduzieren. Zudem ist der Abbildung die Information über die Wirbelbildungslänge L_f zu entnehmen. Diese ist nach Bloor 1964 als der Abstand zwischen Zylinderrückseite ($x/D_{Zyl} = 0$) und der Stelle des Maximalwerts der Standardabweichung der vertikalen Geschwindigkeitskomponente auf der

Mittelachse definiert. Das bedeutet, dass an dieser Stelle Fluid von außerhalb des Nachlaufs den Nachlauf/ Mittelachse durchquert, siehe Gerrard 1966. Die Maximalwerte sind in Abb. 8 eingetragen. Es ist zu erkennen, dass sich die Maxima der Kurven weiter stromab befinden, je größer der Ummantelungswinkel ist.

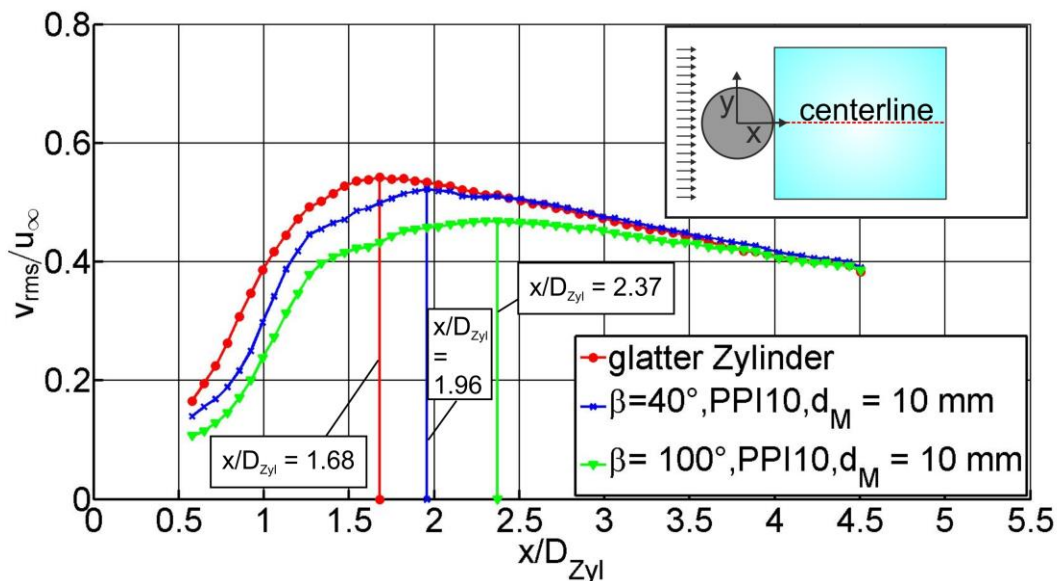


Abb. 8: Standardabweichung der vertikalen Geschwindigkeitskomponente im Nachlauf des Zylinders auf der Mittelachse $y / D_{Zyl} = 0$.

Phasen gemittelte Geschwindigkeitsfelder

Die aufgenommenen Samples von $N = 5000$ können aufgrund der sich periodisch ablösenden Wirbel in konstante Phasenintervalle unterteilt werden. Die „triple decomposition“ nach Reynolds und Hussain 1972 teilt die Strömung in eine zeitlich gemittelte Komponente, periodischen Fluktuationen und zufällige Fluktuationen ein. Die Strömungskomponente, beispielsweise in Hauptströmungsrichtung u , kann wie folgt dargestellt werden:

$$u = \bar{u} + \tilde{u} + u' \quad (\text{Gl. 1})$$

Die Phasenmittelung führt zu:

$$\langle u_i \rangle = \bar{u} + \tilde{u} \quad (\text{Gl. 2})$$

Mit Hilfe der aus dem Frequenzspektrum der Druckmessungen erhaltenen Wirbelablösefrequenzen für den glatten und den leeseitig, porös ummantelten Zylinder ($f_{\text{glatt}} = 16.9 \text{ Hz}$, $f_{\text{porös}} = 18.2 \text{ Hz}$) ergaben sich aus den 5000 PIV-Aufnahmen $N_{\psi} = 84$ (glatter Zylinder) und $N_{\psi} = 91$ (leeseitig, porös ummantelter Zylinder) periodische Ablösezyklen.

Periodische Komponenten des Strömungsfelds

In Abb. 9 ist die Entwicklung der periodischen Komponente $\tilde{u} \tilde{u}$ im Nachlauf für den glatten Referenzzylinder (linke Spalte) und die Zylinderkonfiguration mit leeseitiger poröser Ummantelung ($\beta = 100^\circ$, PPI 10, $d_M = 10 \text{ mm}$) (rechte Spalte) dargestellt. Bei beiden Konfigurationen ist eine Symmetrie zur horizontalen Linie durch den Staupunkt deutlich zu erkennen. Die jeweiligen Extremwerte liegen oberhalb und unterhalb der Symmetrieachse. Dargestellt sind hier vier Phasen ab der Wirbelentstehung ($\psi = 0^\circ$) bis hin zur abgeschlossenen Wirbelentwicklung ($\psi = 135^\circ$). Betrachtet man nun bei der jeweiligen Konfiguration beispielsweise die

Phase $\psi = 135^\circ$ sind die beiden Spitzenwerte von $\tilde{u}\tilde{u}$ mit einem an der Zylinderleeseite bestehenden Wirbel verbunden. Die Maximalwerte befinden sich oberhalb und unterhalb des Wirbels. Vergleicht man die beiden Konfigurationen, so ist festzustellen, dass die periodische Komponente der Zylinderkonfiguration mit leeseitiger, poröser Ummantelung deutlich reduzierte Werte im Vergleich zum glatten Referenzzylinder aufweist. Hier kann eine Differenz von bis zu 42% festgestellt werden.

In Abb. 10 ist die periodische Komponente $\tilde{v}\tilde{v}$ dargestellt. Für diese Darstellung ist ebenfalls eine Symmetrie zur Mittelachse im Zylindernachlauf erkennbar. Man erkennt auch hier die signifikante Reduktion der periodische Komponente $\tilde{v}\tilde{v}$ im Falle einer leeseitigen porösen Beschichtung. Außerdem wird deutlich, dass die jeweiligen Maximalwerte im Vergleich zum glatten Referenzzylinder weiter nach stromab verschoben sind. Die Ursache hierfür ist das weiter nach stromab verschobene Wirbelfeld, denn die Maximalwerte stehen in Zusammenhang mit dem sich jeweils in Uhrzeigersinn drehenden Wirbel.

Weitere Ergebnisse sind der Veröffentlichung Klausmann und Ruck 2017 zu entnehmen.

Schlussfolgerung

Die Analyse des Strömungsfelds zeigt für die zeitlich gemittelten Daten im Nachlauf des leeseitig porös ummantelten Zylinders dass sich das Gebiet von geringeren mittleren Geschwindigkeiten im Nachlauf des Zylinders vergrößert. Außerdem wird die räumliche Anordnung von Teilstrukturen des mittleren Strömungsfelds nach stromab verschoben und auch in ihren absoluten Werten vermindert. Zudem kann gezeigt werden, dass die turbulente kinetische Energie im Nachlauf mit zunehmendem Ummantelungswinkel abnimmt und sich nach stromab verschiebt. Die Ergebnisse veranschaulichen außerdem, dass die horizontalen Schwankungen in der Scherschicht und die vertikalen Schwankungen auf der Mittelachse im Nachlauf mit zunehmendem Ummantelungswinkel abnehmen. Es wird weiterhin ersichtlich, dass je größer der Ummantelungswinkel ist, desto stärker reduziert sich die Nachlaufbreite und desto dünner ist die Scherschicht. Aufgrund der leeseitigen porösen Ummantelung vergrößert sich die Wirbelformationslänge.

Die Mittelung der Daten bei konstanter Phase erlaubt es, signifikante Aussagen über den physikalischen Vorgang des Wirbelbildungs- und ablöseprozesses zu treffen. Der Beginn der sich einrollenden Scherschicht ist für leeseitig porös ummantelte Zylinder weiter nach Unterstrom verschoben. Verantwortlich für die gewonnenen Ergebnisse ist die Störung bzw. das nicht Zustandekommen des Mechanismus des Hoch- und Herunterlaufens des Primärwirbels an der Leeseite des porös ummantelten Zylinders. Die Vergrößerung der Wirbelformationszone und der damit ansteigende Druck bzw. verminderte Unterdruck auf der Zylinderrückseite ist somit direkt gekoppelt an eine Reduktion des Widerstands.

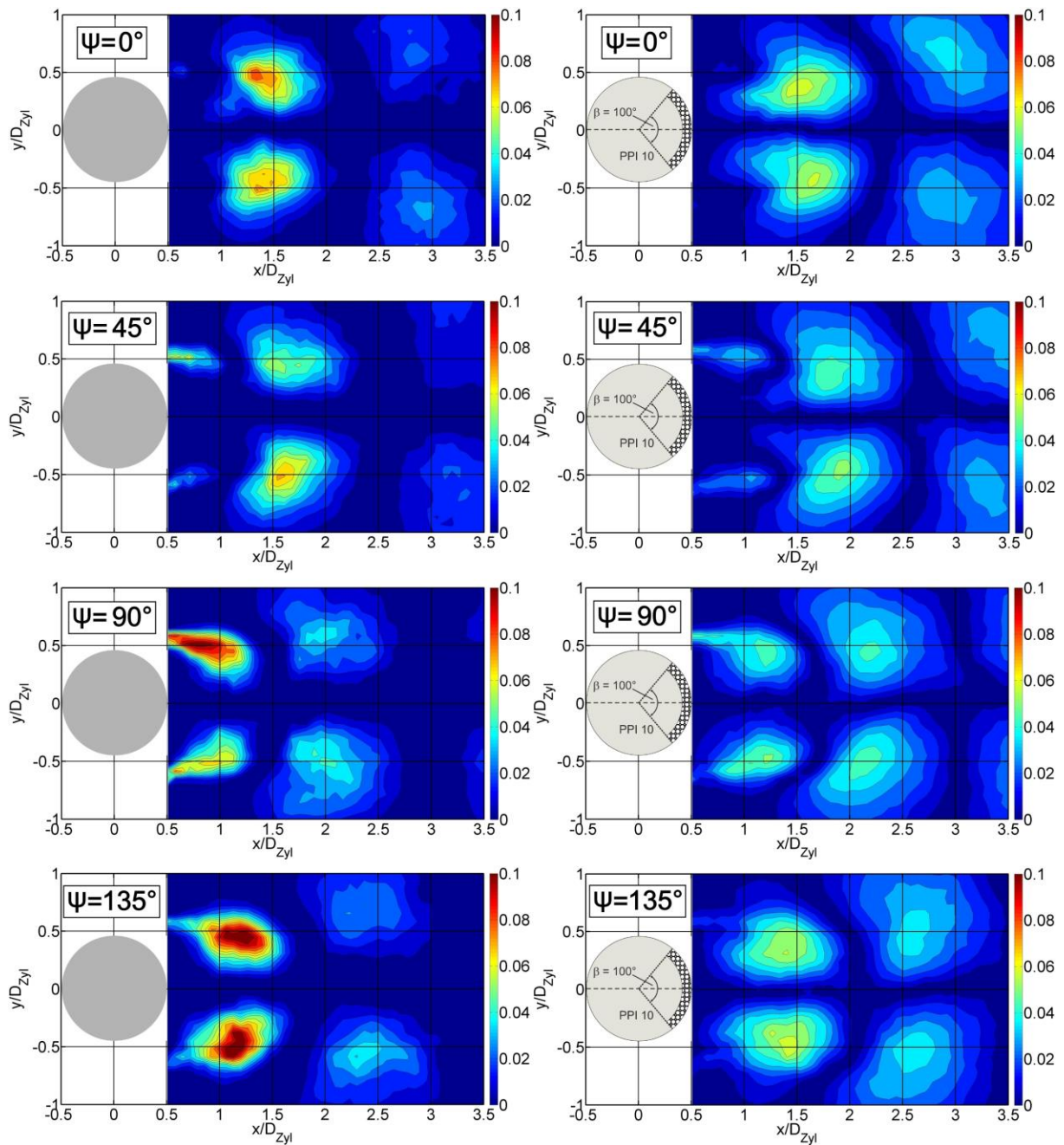


Abb. 9: Periodische Komponente $\tilde{u}\tilde{u}/u_\infty^2$ für den glatten Referenzzylinder (linke Spalte) und die Konfiguration mit leeseitiger, poröser Ummantelung ($\beta = 100^\circ$, PPI 10, $d_M = 10$ mm) (rechte Spalte) für die Phasenwinkel $\psi = 0^\circ$ - 135° .

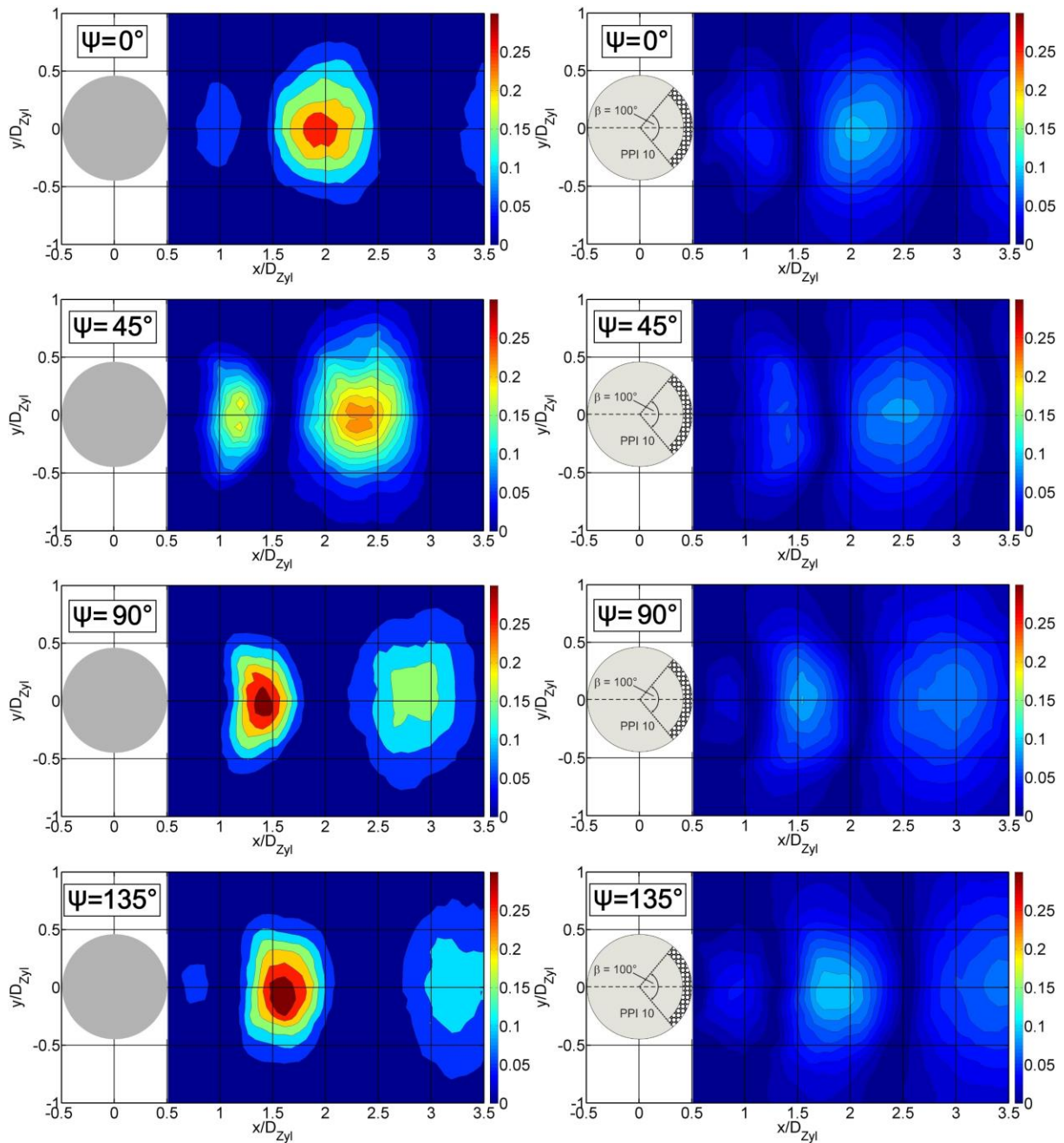


Abb. 10: Periodische Komponente $\tilde{v}\tilde{v} / u_\infty^2$ für den glatten Referenzzylinder (linke Spalte) und die Konfiguration mit leeseitiger, poröser Ummantelung ($\beta = 100^\circ$, PPI 10, $d_M = 10$ mm) (rechte Spalte) für die Phasenwinkel $\psi = 0^\circ$ - 135° .

Dankesworte

Die Autoren bedanken sich bei der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die Förderung des Projekts Ru 345/34-1.

Literatur

E. Achenbach, *Influence of surface roughness on the cross-flow around a circular cylinder*, Journal of Fluid Mechanics, Vol. 46, part 2, pp. 321-335, 1971.
P.W. Bearman and J.K. Harvey, *Control of circular cylinder flow by the use of dimples*, AIAA Journal, Vol. 31, No. 10, 1993.

- S. Bloor, *The transition to turbulence in the wake of a circular cylinder*, Journal of Fluid Mechanics 19 (2), 290, 1964.
- A. Fage und J.H. Warsap, *The effect of turbulence and surface roughness on the drag of a circular cylinder*, Aeronautical Research Committee, No. 1283, 1929.
- R.A. Galbraith, *Aspects of the flow in the immediate vicinity of porous shroud*, Journal of wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 8, pp. 251-258, 1981
- J.H. Gerrard, *The mechanics of the formation region of vortices behind bluff bodies*. Journal of Fluid Mechanics 25 (2), 401-413, 1966.
- K. Klausmann und B. Ruck, *Drag reduction of circular cylinders by porous coating on the leeward side*. Journal of Fluid Mechanics 813, 382-411, 2017.
- H. Naito, K. Fukagata, *Numerical simulation of flow around a circular cylinder having porous surface*. Physics of fluids, 24, 2012.
- P. Price, *Suppression of the fluid-induced vibration of circular cylinders*, J. Eng. Mech. Div. , Am. Soc. Civ. Eng., 82, Paper 1030, 1956.
- W.C. Reynolds, A.K.M.F. Hussain, *The mechanism of an organized wave in turbulent shear flow. Part3. Theoretical model and comparison with experiments*. Journal of Fluid Mechanics, Vol. 54, pp. 263-288, 1972.
- T. Sueki, et al, *Application of porous material to reduce aerodynamic sound from bluff bodies*. Fluid dynamics research, 42, 2010.
- H.Y.Wong, *A means of controlling bluff body flow separation*, Journal of Industrial Aerodynamics, 4, pp. 183- 201, 1979.
- M. M. Zdravkovich, *Flow around circular cylinders vol 1: Fundamentals*, Oxford University Press, 1997.