Experimentelle Untersuchung der Minderung von Strömungsschall durch poröse Zylinderummantelungen

Thomas F. Geyer, Ennes Sarradj

Lehrstuhl Technische Akustik, BTU Cottbus-Senftenberg, 03046 Cottbus, Deutschland, Email: thomas.geyer@b-tu.de

Einleitung

Eine der maßgeblichen aeroakustischen Schallquellen ist der bei der Umströmung von Zylindern entstehende Schall, welcher zum Beispiel an Teilen des Fahrwerks von Flugzeugen oder an Pantografen von Zügen auftritt. Er enthält sowohl tonale Anteile aufgrund der regelmäßigen Wirbelablösung als auch breitbandige Anteile. Eine Möglichkeit zur Lärmminderung besteht in der Verwendung poröser Zylinderummantelungen.

In einer an der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus - Senftenberg durchgeführten Studie wurde der durch eine Reihe porös ummantelter Zylinder erzeugte Schall in einem aeroakustischen Windkanal gemessen [1]. Dabei war das Hauptziel der Untersuchung, den Einfluss der Materialien auf den entstehenden tonalen und breitbandigen Schall systematisch zu quantifizieren.

Im vorliegenden Beitrag werden hinsichtlich der Schallentstehung an den porös ummantelten Zylindern zusätzliche Aspekte zu [1] betrachtet. Dazu zählt eine andere Art der Messdatenverarbeitung, um den Dipolanteil des zylindergenerierten Schalls besser vom Rauschanteil trennen zu können. Um zusätzlich Aussagen zur Beeinflussung der Zylinderaerodynamik zu ermöglichen, wurden Messungen mit Hilfe der Konstant-Temperatur-Anemometrie durchgeführt.

Messaufbau

Alle Messungen fanden im aeroakustischen Windkanal der BTU statt. Zur Verwendung kam dabei eine Düse, die einen rechteckigen Austrittsquerschnitt von 0,28 m × 0,23 m hat. Die Maximalgeschwindigkeit beträgt mit dieser Düse etwa 58 m/s. Direkt an der Düse war eine Messstrecke befestigt, in deren Mitte die Zylinder positioniert wurden. Die beiden Seitenwände dieser Messstrecke bestehen aus sehr straff gespanntem Kevlar. Dadurch ergibt sich im Inneren der Teststrecke eine quasi-zweidimensionale Strömung, während die schalldurchlässigen Kevlarfenster die Verwendung von außerhalb der Messstrecke positionierter akustischer Messtechnik erlauben.

Porös ummantelte Zylinder

Die für die Untersuchungen verwendeten Zylinder bestehen aus einem nichtporösen Kernzylinder mit einem Durchmesser $d = 10$ mm, der mit weichen, offen-porösen Materialien (Schaumstoffe, Gummigranulatmatten) ummantelt ist. Der resultierende Außendurchmesser D beträgt 30 mm, die Länge der Zylinder 0,28 m.

Die porösen Materialien werden durch ihren längenbezogenen Strömungswiderstand charakterisiert, der nach DIN EN 29053 [2] gemessen wurde. Tabelle 1 gibt eine Übersicht der verwendeten Zylinder.

Tabelle 1: Längenbezogene Strömungswiderstände der verwendeten Zylinder, gemessen nach DIN EN 29053 [2]

Name	Material	Ξ [Pa s/m^2]
Referenz	PVC	∞
Gummi 1	Damtec black uni	1.474.300
Gummi 2	Damtec standard	594.200
Schaum 1	Oasis Rainbow Schaum	416.200
Schaum 2	ArmaFoam Sound	112.100
Gummi 3	Damtec USM	86.100
Gummi 4	Damtec vibra ultra	75.600
Gummi 5	Conmetall Gummimatte	53.200
Gummi 6	Damtec Estra	12.900
Schaum 3	Basotect	9.800
Gummi 7	Damtec black rubber	9.400
Schaum 4	Verpackungsschaum	4.100
Schaum 5	Panacell 90 ppi	4.000

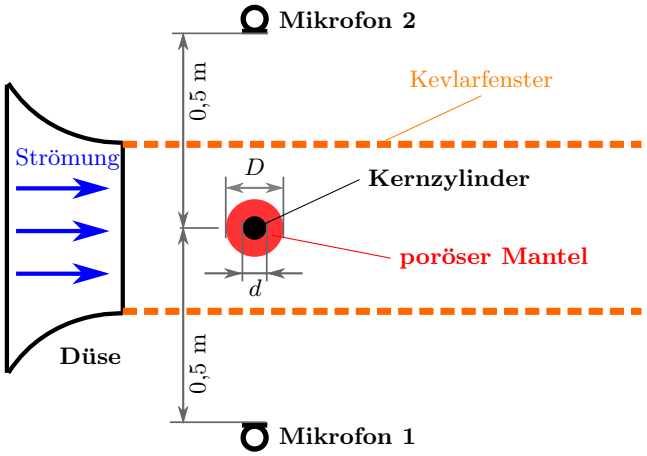


Bild 1: Aufbau für akustische Messungen (Draufsicht)

Messung der Schallentstehung

Die Messung der Schallentstehung erfolgte unter Verwendung zweier 1/4-Zoll Messmikrofone, die auf gegenüberliegenden Seiten der Teststrecke im Abstand von 0,5 m senkrecht zur Zylinderachse und senkrecht zur Strömung aufgestellt waren (siehe Bild 1).

Die Messung erfolgte mit einer Abtastfrequenz von 51,2 kHz über einen Zeitraum von 60 s. Anders als in [1] wurden hier jedoch nicht die korrigierten Autospektren

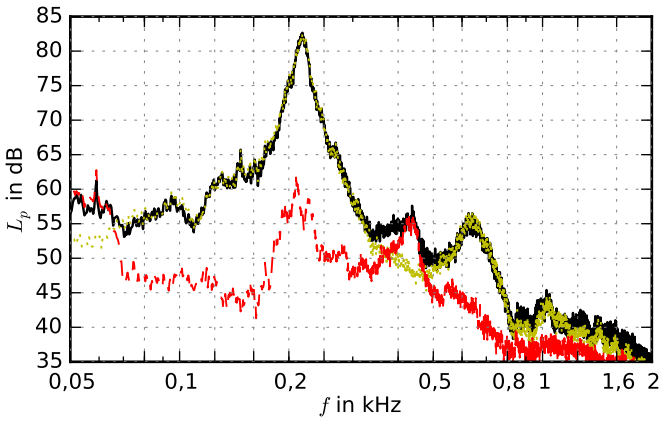


Bild 2: Test des Auswerteverfahrens an einer Messung am nicht-porösen Referenzzylinder, $Re \approx 72.600$ (▬ Autospektrum Mikrofon 1, ▬ Addition beider Kanäle mit 180° Phasenverschiebung, ▬ Addition beider Kanäle ohne Phasenverschiebung)

eines der beiden Mikrofone verwendet, sondern es wurde die Tatsache ausgenutzt, dass die Mikrofone sich in gleichem Abstand, jedoch auf unterschiedlichen Seiten des Zylinders befinden. Geht man von einer reinen Dipolschallquelle aus, so ergeben sich daher identische, jedoch um 180° zueinander phasenverschobene Zeitsignale.

Werden beide Kanäle mit einer Phasenverschiebung von 180° addiert (also subtrahiert), so bleibt demnach nur der tonale Anteil des Zylindergenerierten Schalls übrig, der eine Dipolcharakteristik aufweist. Werden die Kanäle ohne Phasenverschiebung addiert, so bleiben nur die Rauschanteile übrig. Abschließend wurden die Zeitsignale mittels Fast Fourier Transformation (blockweise, Hanning-Fenster mit 16.384 Abtastwerten und 75 % Überlappung) in den Frequenzbereich überführt. Zur Korrektur der Amplitude wurden 6 dB subtrahiert. Das Ergebnis dieses Verfahrens ist beispielhaft in Bild 2 für eine Messung am Referenzzylinder dargestellt.

Durch die phasenverschobene Addition der beiden Kanäle bleiben im Wesentlichen das Hauptmaximum bei etwa 218 Hz, welches durch die regelmäßige Wirbelablösung am Zylinder hervorgerufen wird, sowie eine Harmonische bei 640 Hz, übrig. Interessanterweise wird ein weiteres deutliches Maximum, welches im Autospektrum bei etwa 437 Hz auftritt und vermutlich durch eine Reflexion in der Messstrecke verursacht wird, unterdrückt. Dieses ist dafür im Spektrum der ohne Phasenverschiebung addierten Signale zu finden.

Messung der Nachlaufcharakteristik

Zusätzlich zu den akustischen Messungen erfolgten Hitzdrahtmessungen mit Hilfe der Konstant-Temperatur-Anemometrie (CTA) im Nachlauf einiger Zylinder. Dazu wurde eine gerade Dantec-Eindrahtsonde verwendet. Um den Zugang für die Sonde zu ermöglichen, wurde eine Seitenwand der Messstrecke entfernt. Um eine vergleichbare Strömung um den Zylinder zu gewährleisten, wurde der vorderste Teil des offenen Fensters, auf Höhe des Zylinders, mit einem Brett abgedeckt (siehe Bild 3). Die

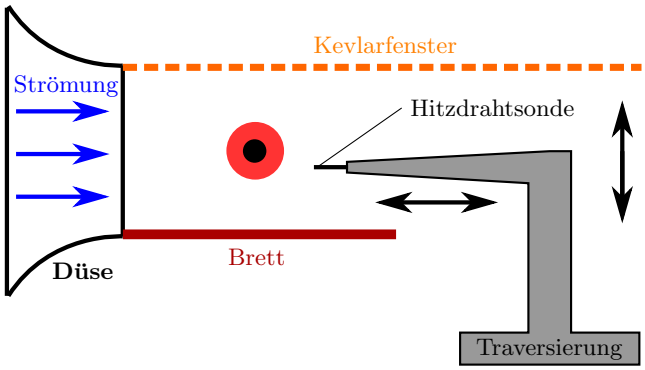


Bild 3: Aufbau für CTA-Messungen (Draufsicht)

Messung erfolgte mit einer Abtastfrequenz von 25,6 kHz. Zur Positionierung der Sonde kam eine 3D-Traversierung der Firma Isel zum Einsatz.

Insgesamt wurden je zwei Messungen durchgeführt. In einem ersten Schritt wurde in einem Abstand von $x/D = 1$ stromab des Zylinders dessen Nachlaufprofil gemessen. Dabei wurde an 40 Messpositionen entlang einer horizontalen Linie (in y-Richtung, senkrecht zum Zylinder) gemessen. Der Abstand zwischen benachbarten Messpunkten betrug 2 mm, die Messdauer jeweils 11 s. Aus den Daten lässt sich neben dem Turbulenzgrad auch die mittlere Geschwindigkeit $U(y)$ bestimmen. Aus dieser kann wiederum die Widerstandskraft F_D sowie der zugehörige Widerstandskoeffizient c_D nach

$$F_D = \rho L \int_{-\infty}^{\infty} U(U_0 - U)dy \quad \text{und} \quad c_D = \frac{2F_D}{\rho U_0^2 LD} \quad (1)$$

bestimmt werden. Dabei ist U_0 die Geschwindigkeit vor dem Zylinder, ρ die Luftdichte und L die Zylinderlänge.

In einem zweiten Schritt wurde in Anlehnung an [3] das Spektrum der turbulenten Geschwindigkeitsschwankungen in der Zylinderscherschicht gemessen. Dazu wurde die Sonde einen Zylinderdurchmesser stromab und einen halben Durchmesser seitlich von der Zylindermitte versetzt positioniert. Die Messdauer betrug 80 s.

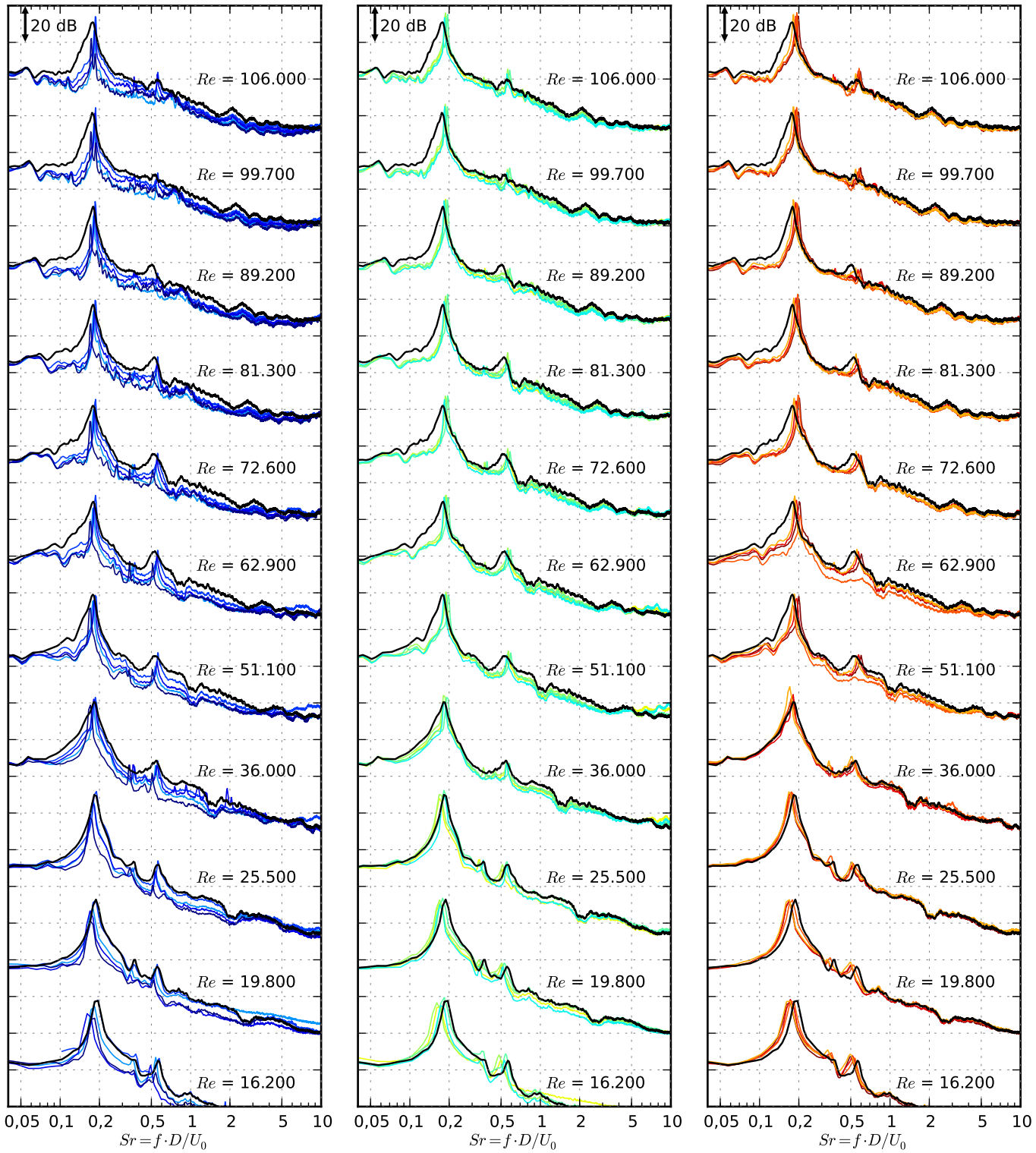
Ergebnisse

Schallentstehung

Bild 4 zeigt den an beiden Mikrofonen gemessenen und durch phasenrichtige Addition gewonnenen Schalldruckpegel L_p als Funktion der Strouhalzahl $f \cdot D/U_0$. Wie bereits beschrieben entsprechen diese Pegel somit dem Dipolanteil des abgestrahlten Schalls. Dargestellt sind Messwerte für verschiedene Reynoldszahlen $Re = U \cdot D/\nu$, wobei ν die kinematische Viskosität von Luft ist.

Zur besseren Übersicht sind die porösen Materialien in Bild 4 aufgeteilt in Materialien mit

- niedrigen längenbezogenen Strömungswiderständen $\Xi < 10$ kPa s m^{-2} (Bild 4(a)),
- mittleren längenbezogenen Strömungswiderständen 10 kPa s m^{-2} $\leq \Xi <$ 100 kPa s m^{-2} (Bild 4(b)) und



(a) Niedrige Strömungswiderstände (Schaum 3, Gummi 7, Schaum 4, Schaum 5)

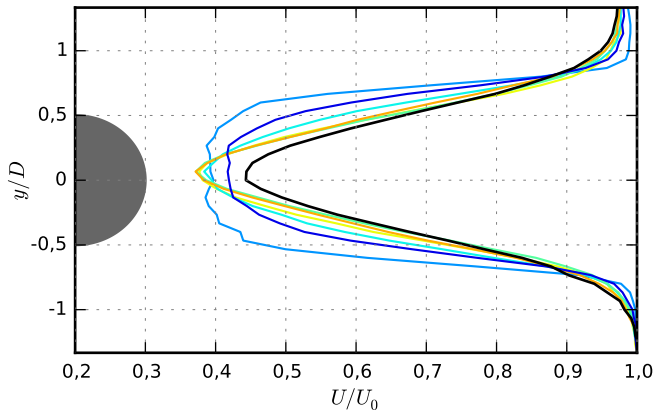
(b) Mittlere Strömungswiderstände (Gummi 3, Gummi 4, Gummi 5, Gummi 6)

(c) Hohe Strömungswiderstände (Gummi 1, Gummi 2, Schaum 1, Schaum 2)

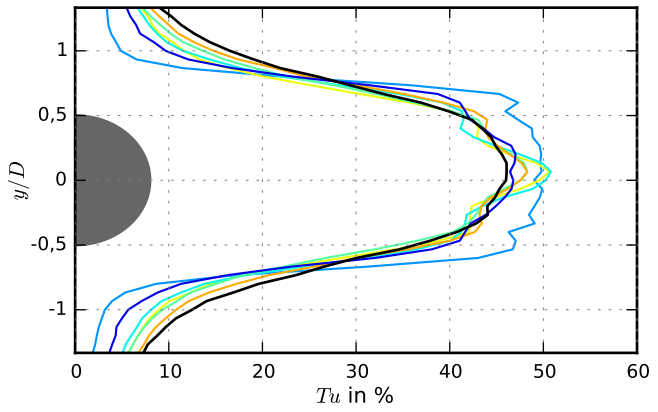
Bild 4: Gemessene Schalldruckpegelspektren der Zylinder aus Tabelle 1 (▬ Referenzzylinder)

- hohen längenbezogenen Strömungswiderständen $\Xi \geq 100$ kPa s m^{-2} (Bild 4(c)).

Aus den dargestellten Schalldruckpegelspektren lassen sich wesentliche Schlussfolgerungen hinsichtlich des Einflusses der porösen Zylinderummantelungen ziehen. Es ist ersichtlich, dass der maximale Schalldruckpegel im Bereich der Wirbelablösefrequenz durch die porösen Materialien nicht zwangsweise geringer wird, dafür sind die tonalen Maxima bei den porösen Zylindern jedoch deutlich schmaler ausgeprägt. Für eine möglichst wirkungsvolle Lärmminderung sind dabei vor allem Materialien mit niedrigen Strömungswiderständen sinnvoll, da bei diesen zum einen der tonale Bereich deutlich schmaler wird, zum



(a) Mittlere Geschwindigkeit U



(b) Turbulenzgrad Tu

Bild 5: Mittlere Geschwindigkeit und Turbulenzgrad im Zylindernachlauf bei $Re \approx 72.600$ (Referenz, Schaum 2, Schaum 3, Schaum 4, Gummi 3, Gummi 5, Gummi 6)

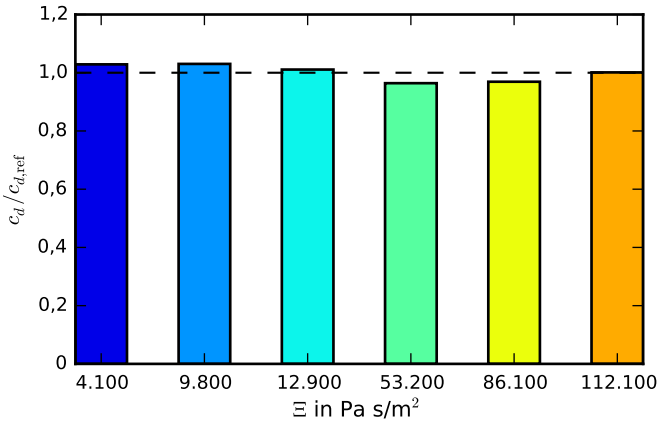


Bild 6: Beeinflussung des Widerstandskoeffizienten durch poröse Ummantelungen bei $Re \approx 72.600$

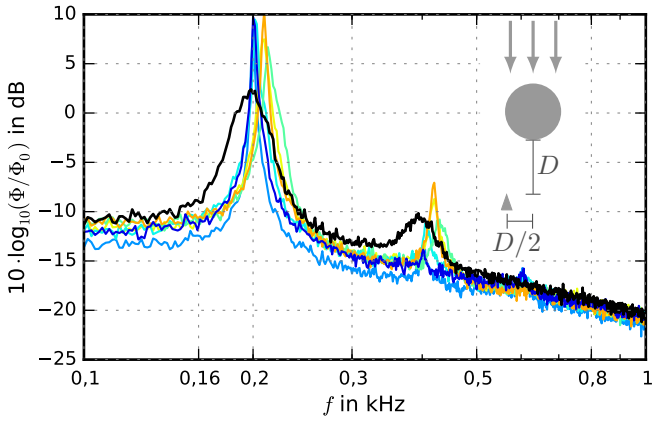


Bild 7: Spektren der turbulenten Geschwindigkeitsschwankungen in der Scherschicht der Zylinder bei $Re \approx 72.600$ (Dreieck symbolisiert Position der Hitzdrahtsonde in Bezug auf den Zylinder, Referenz, Schaum 2, Schaum 3, Schaum 4, Gummi 3, Gummi 5, Gummi 6)

anderen ergibt sich bei solchen Materialien auch eine deutliche breitbandige Lärmminderung oberhalb der tonalen Maxima.

Nachlaufcharakteristik

Bild 5 zeigt die gemessenen mittleren Geschwindigkeiten und Turbulenzgrade im Nachlauf ausgewählter Zylinder. Es zeigt sich, dass die poröse Beschaffenheit und die damit einhergehende erhöhte Oberflächenrauheit die Form des Nachlaufs beeinflussen. Es kommt jedoch nicht ausschließlich zu einer Verbreiterung des Nachlaufs, denn gerade in den Außenbereichen ($|y/D| > 0{,}8$) ist eine Erhöhung der mittleren Geschwindigkeit gegenüber dem Referenzzylinder zu beobachten.

Bild 6 zeigt den nach Gleichung (1) berechneten Widerstandskoeffizienten der porösen Zylinder bezogen auf den des Referenzzylinders. Während Materialien mit niedrigen und hohen Strömungswiderständen zu einer leichten Erhöhung des Widerstandskoeffizienten um bis zu 3 % führen, kommt es für die beiden Materialien mit mittleren Strömungswiderständen von 53.200 und 86.100 Pa s m^{-2} zu einer Widerstandsreduktion um etwa 4 %.

Bild 7 zeigt die in der Scherschicht der Zylinder gemessenen Turbulenzspektren. Wie schon bei den in Bild 4 gezeigten akustischen Spektren ist ersichtlich, dass mit sinkendem längenbezogenen Strömungswiderstand der porösen Materialien das durch Wirbelablösung verursachte Maximum schmaler wird.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich bei Martin Noack für die Hilfe bei den Messungen und bei Julien Grilliat für die hilfreiche Diskussion zur Datenauswertung.

Literatur

[1] Geyer, T. F., Sarradj, E., Circular cylinders with soft porous cover for flow noise reduction. Exp Fluids, 57(30), 1–16 (2016)

[2] DIN EN 29053, Materialien für akustische Anwendungen: Bestimmung des Strömungswiderstandes. (1993)

[3] Bearman, P. W., On vortex shedding from a circular cylinder in the critical Reynolds number regime. J Fluid Mechanics, 37(03), 577–585 (1969)