Schallminderung an einer umströmten Tandem-Zylinder-Anordnung durch poröses Material

Thomas F. Geyer[1], Sparsh Sharma[2], Baran Calisci
Fachgebiet Technische Akustik, Brandenburgische Technische Universität Cottbus - Senftenberg, 03046 Cottbus, Deutschland,
Email: [1]thomas.geyer@b-tu.de, [2]sparsh.sharma@b-tu.de

Einleitung

Der an Teilen des Fahrwerks von Flugzeugen entstehende Umströmungsschall wird oftmals vereinfacht an einer sogenannten Tandem-Zylinder-Anordnung untersucht, bei der sich in einem definierten Abstand stromab eines Zylinders ein zweiter Zylinder gleichen Durchmessers befindet (schematisch dargestellt in Abbildung 1). Der dabei entstehende Schall ist durch einen starken tonalen Anteil gekennzeichnet.

Für diese Anordnung existiert auch ein sogenannter Benchmark-Test [1], und in der Folge haben bereits viele Forscher diese Anordnung sowohl experimentell als auch numerisch untersucht (siehe zum Beispiel [2, 3, 4, 5]). In diesem Benchmark-Test beträgt der Abstand zwischen beiden Zylindern in Strömungsrichtung 3,7 Zylinderdurchmesser. Ein wesentliches Ergebnis der vorhandenen Untersuchungen ist beispielhaft anhand von gemessenen Spektren der Geschwindigkeitsfluktuationen im Nachlauf einer solchen Anordnung im Vergleich zu einem Einzelzylindernachlauf in Abbildung 2 dargestellt: Durch das Hinzufügen des zweiten Zylinders ändert sich sowohl die Frequenz als auch die Amplitude des tonalen Schalls.

Basierend auf Untersuchungen an umströmten Einzelzylindern, deren aerodynamische Schallentstehung durch die Verwendung einer porösen Ummantelung deutlich gemindert werden konnte [6, 7, 8, 9], ist diese Maßnahme in einer aktuellen experimentellen Studie auf eine Tandem-Zylinder-Anordnung angewandt worden. Dabei wurden sowohl beide Zylinder einzeln als auch beide gleichzeitig mit verschiedenen, offen-porösen Materialien ummantelt und in einem aeroakustischen Windkanal umströmt. Neben den im vorliegenden Beitrag gezeigten Ergebnissen finden sich weitere Resultate dieser Untersuchung in [10].

Bisher gibt es keine weiteren experimentellen Studien zum Effekt einer porösen Zylinderummantelung auf die Schallentstehung einer Tandem-Zylinder-Anordnung, aber es existieren detaillierte numerische Untersuchungen [11, 12]. Diese zeigen, dass eine poröse Ummantelung zu einer deutlichen Minderung des tonalen Schalldruckpegels sowie zu einer Verringerung der Frequenz des tonalen Maximums führt. Vor allem ergaben die Simulationen, dass eine Ummantelung des stromauf platzierten Zylinders viel wirksamer als eine Ummantelung des stromab platzierten Zylinders ist. Diese Ergebnisse sollen ebenfalls in der hier vorgestellten experimentellen Studie überprüft werden.

Zusätzlich zu den Messungen an porös ummantelten Zylindern wurden im Rahmen dieser Studie als Teil einer geplanten größeren Untersuchung erste 2D-Simulationen der Umströmung einer Tandem-Zylinder-Anordnung ohne poröse Ummantelung durchgeführt.

Abbildung 1: Schema einer Tandem-Zylinder-Anordnung.

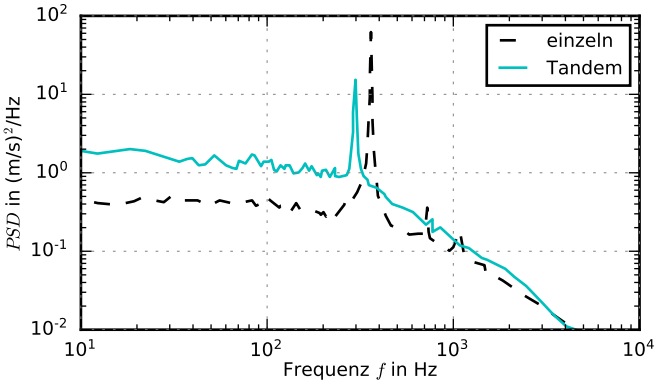


Abbildung 2: Gemessene Spektren der Geschwindigkeitsfluktuationen im Nachlauf eines Einzelzylinders und einer Tandem-Zylinder-Anordnung aus [2].

Experimentelle Untersuchung

Alle Messungen fanden im aeroakustischen Windkanal der BTU in Cottbus [13] statt. Dazu wurde eine Düse mit rechteckigem Austrittsquerschnitt (0,23 m × 0,28 m) verwendet. Die Zylinder wurden zwischen zwei Seitenplatten aus Plexiglas befestigt (siehe Abbildung 3). Die akustischen Messungen erfolgten mit drei Viertelzoll-Messmikrofonen, die seitlich der Tandem-Zylinder-Anordnung außerhalb der Strömung positioniert waren. Sie sind in Abbildung 3 als Mikrofone A, B und C bezeichnet. Die eingestellte Abtastfrequenz betrug 51,2 kHz bei einer Messdauer von 60 s. Die gemessenen Zeitsignale wurden anschließend mittels blockweiser Fast Fourier Transformation in den Frequenzbereich überführt (Blockgröße 65536 Abtastwerte, 75 % Überlappung, von-Hann-Fensterfunktion) und in Schalldruckpegel umgerechnet.

Zusätzlich zu den akustischen Messungen wurden Messungen des Strömungsfeldes mit Hilfe der Hitzdrahtanemometrie durchgeführt. Aus Platzgründen werden im vorliegenden Beitrag keine Ergebnisse dieser Experimen-

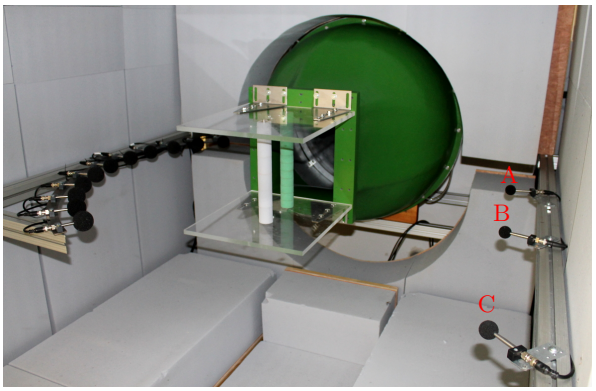


Abbildung 3: Foto des Messaufbaus im Windkanal.

Tabelle 1: Übersicht der in den Messungen verwendeten Zylindermodelle (Durchmesser $D = 40$ mm, Länge $L = 280$ mm).

Name	Beschreibung	längenbezogener - Strömungswiderstand
Ref	Referenz (PU)	∞
Mat 1	Regufoam Vibration 150 plus	64.500 Pa s/m^2
Mat 2	Basotect	9.800 Pa s/m^2
Mat 3	Panacell 90 ppi	4.000 Pa s/m^2
Mat 4	Panacell 45 ppi	700 Pa s/m^2

te gezeigt, es finden sich jedoch erste Resultate in [10].

Insgesamt wurden für die Untersuchungen an porös ummantelten Zylindern vier verschiedene offenporöse Materialien verwendet. Diese sind durch ihren längenbezogenen Strömungswiderstand Ξ gekennzeichnet. Dieser Parameter ist umgekehrt proportional zur Permeabilität K und gibt entsprechend Auskunft über den Widerstand eines Materials gegen eine gleichmäßige Durchströmung. Er wurde nach DIN EN ISO 29053 [14] bestimmt.

Die Zylindermodelle bestehen aus einem inneren Kunststoffzylinder mit einem Durchmesser von 20 mm, über den Ringe aus porösem Material gestreift werden, so dass sich ein porös ummantelter Zylinder mit einem Außendurchmesser $D = 40$ mm ergibt. Zusätzlich zu den porös ummantelten Zylindern wurden Zylinder aus Kunststoff mit gleichem (Außen-)Durchmesser von 40 mm als Referenz verwendet. Alle Zylinder hatten eine Länge $L = 280$ mm, wodurch sich ein Aspektverhältnis $L/D = 7$ ergibt. Tabelle 1 gibt eine Übersicht der verwendeten Zylinder, während Abbildung 4 eine Fotografie von drei der verwendeten Zylindermodelle zeigt.

Die Messungen fanden bei Reynoldszahlen zwischen $1{,}5{\cdot}10^4$ und $1{,}3{\cdot}10^5$ (bezogen auf den Außendurchmesser D) statt. In einem ersten Schritt wird der an der Referenz-Tandem-Anordnung (ohne poröse Ummantelung) entstehende Schall mit dem an einem umströmten Einzelzylinder entstehenden Schall verglichen (Abbildung 5). Auch wenn, anders als in Abbildung 2, der Maximalpegel für den Einzelzylinder deutlich niedriger ist als der für die Tandem-Zylinder-Anordnung, ergibt sich doch

Abbildung 4: Beispiele der verwendeten Zylinder (links: Ref, Mitte: Mat 4, rechts: Mat 1).

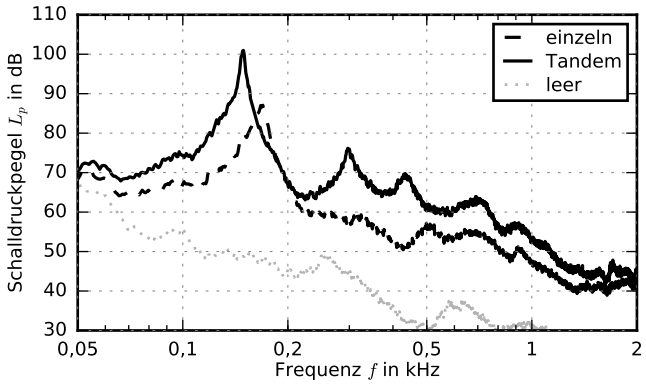
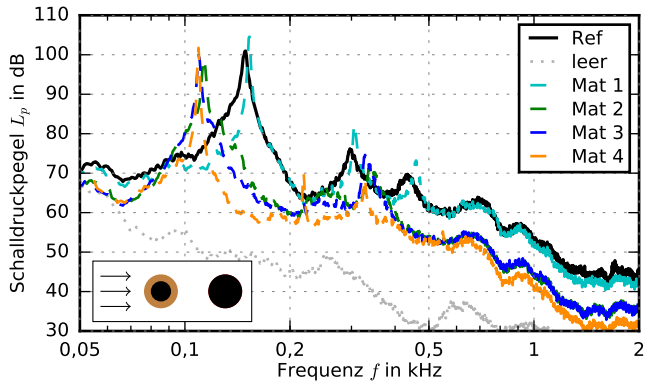


Abbildung 5: Mit Mikrofon B (siehe Abbildung 3) gemessene Schalldruckpegelspektren der Referenz-Tandem-Zylinder-Anordnung und eines Einzelzylinders bei einer Reynoldszahl von $9{,}38{\cdot}10^4$.

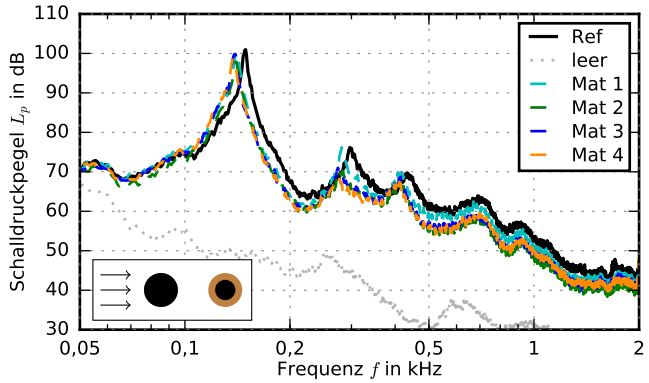
insgesamt ein ähnliches Bild: Durch den zweiten Zylinder verschiebt sich das Maximum des tonalen Schalls zu tieferen Frequenzen und der breitbandige Schall nimmt deutlich zu.

In Abbildung 6 sind exemplarisch Ergebnisse der Messungen an der durch poröses Material modifizierten Tandem-Zylinder-Anordnung bei einer Reynoldszahl von $9{,}38{\cdot}10^4$ dargestellt. Dabei zeigt Abbildung 6(a) Schalldruckpegelspektren für diejenigen Konfigurationen, bei denen der stromauf platzierte Zylinder porös ummantelt, der stromab gelegene Zylinder jedoch nicht modifiziert ist. In Übereinstimmung mit numerischen Ergebnissen aus [11, 12] zeigt sich ein deutlicher Effekt der porösen Ummantelung vor allem für Materialien mit niedrigen und mittleren längenbezogenen Strömungswiderständen. Dort kommt es zu einer merklichen Verschiebung des tonalen Maximums zu tieferen Frequenzen. Obwohl der maximale Schalldruckpegel mitunter sogar höher ist als der für die Referenzanordnung, ist das Pegelmaximum deutlich schmaler. Zusätzlich führen die porösen Ummantelungen zu einer starken Minderung des breitbandigen Schalls.

Wird nur der stromab platzierte Zylinder mit einer porösen Ummantelung versehen (Abbildung 6(b)), so ergibt sich nur eine minimale Verschiebung des tonalen Schalls zu tieferen Frequenzen hin. Aber auch in diesem Fall kommt es zu einer deutlichen Minderung des

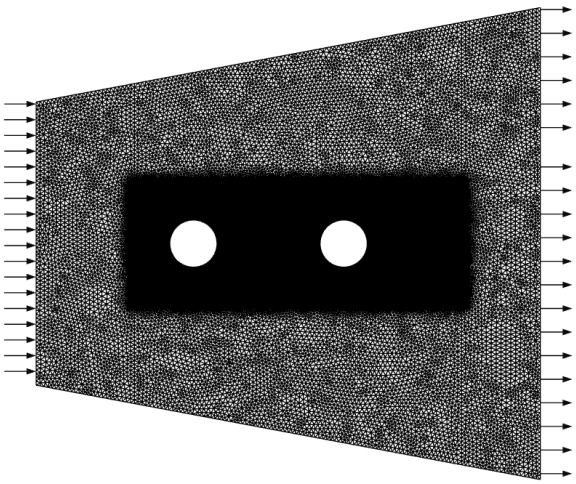


(a) Modifikation des stromauf platzierten Zylinders.

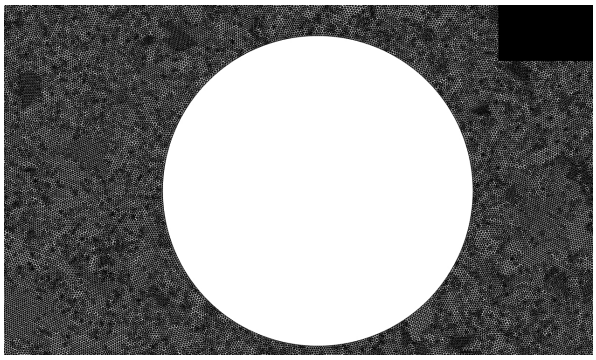


(b) Modifikation des stromab platzierten Zylinders.

Abbildung 6: Mit Mikrofon B (siehe Abbildung 3) gemessene Schalldruckpegelspektren bei einer Reynoldszahl von $9{,}38{\cdot}10^4$.



(a) Gesamtes Netz.



(b) Verfeinertes Netz im Bereich der Zylinderoberfläche.

Abbildung 7: In den Simulationen verwendetes Rechennetz.

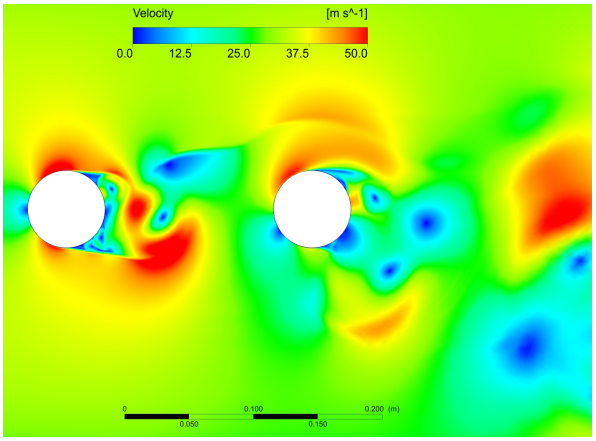
breitbandigen Schalls. Hier nicht gezeigt (aber enthalten in [10]) ist der Fall, dass beide Zylinder porös ummantelt sind. Dann ergibt sich eine noch etwas stärkere Verschiebung des tonalen Maximums zu tiefen Frequenzen. Grundsätzlich bestätigen jedoch die vorliegenden experimentellen Ergebnisse die Aussage aus [12], dass die Modifikation des stromauf platzierten Zylinders mit porösem Material den größten Einfluss hat.

Numerische Untersuchung

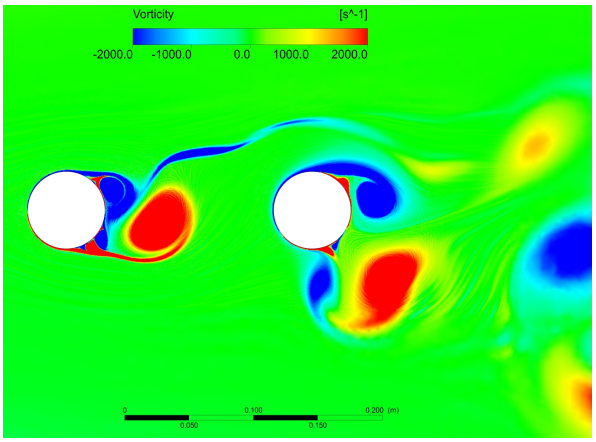
Zusätzlich zu den Experimenten wurden zweidimensionale Detached Delayed Eddy Simulationen (DDES) für die nichtporösen Referenzanordnung mit der Software Ansys Fluent durchgeführt, um ein besseres Verständnis der vorliegenden Strömungsverhältnisse zu erhalten. Dazu wurde das k-ω-Turbulenzmodell verwendet. Die Geometrie der Anordnung entsprach dabei weitestgehend der des experimentellen Aufbaus, jedoch wurden Zylinder mit einem etwas größeren Durchmesser von 60 mm verwendet. Der Abstand wurde entsprechend angepasst, so dass sich wieder ein dimensionsloser Abstand von $\Delta x/D = 3{,}7$ zwischen beiden Zylinderachsen ergibt. Das zweidimensionale Simulationsgebiet erstreckt sich von $5D$ stromauf des ersten Zylinders ("velocity inlet"-Randbedingung) bis $15D$ stromab des ersten Zylinders ("pressure outlet"-Randbedingung) und jeweils $5D$ zur oberen und unteren Grenze. Die Zylinderwände wurden mit der "no slip"-Randbedingung belegt. Die Vernetzung erfolgte mit dreieckigen Elementen. Um einen dimensionslosen Wandabstand von $y^+ \approx 1$ zu erreichen, wurde die Netzauflösung an der Oberfläche der Zylinder verfeinert (siehe Abbildung 7). In den Simulationen wurde ein Zeitschritt von 0,0001 s gewählt. Die Dauer des gesamten Signals betrug 0,2 s.

Als Ergebnis der Simulationen werden in Abbildung 8 beispielhaft Visualisierungen des instantanen Strömungsfeldes gezeigt. Dabei ist in Abbildung 8(a) der Betrag des Geschwindigkeitsvektors und in Abbildung 8(b) die entsprechende Wirbelstärke beim gleichen Zeitschritt dargestellt. Dabei zeigt sich ein deutlicher Einfluss des stromab platzierten Zylinders auf den Nachlauf des stromauf positionierten Zylinders. So ist beispielsweise das Gebiet niedriger Geschwindigkeit sehr schmal und in der Nähe des stromab platzierten Zylinders verzerrt. Das Rezirkulationsgebiet des stromauf platzierten Zylinders wird ebenfalls gestört und größere Wirbel zerfallen durch die Interaktion mit dem stromab platzierten Zylinder in kleinere Wirbel. All diese Effekte weisen bereits im dargestellten zweidimensionalen Fall auf sehr komplexe Strömungsphänomene hin, die letztlich zu der in Abbildung 5 gezeigten Veränderung des Schalldruckpegels im Fernfeld führen.

Grundsätzlich muss jedoch angemerkt werden, dass die



(a) Geschwindigkeit.



(b) Wirbelstärke.

Abbildung 8: Visualisierung der Umströmung der Tandem-Zylinder-Anordnung (Zylinderdurchmesser 60 mm, $Re = 1{,}25{\cdot}10^5$.

Umströmung eines Zylinders aufgrund von in Spannweitenrichtung auftretenden Strömungsphänomenen ein klares dreidimensionales Problem darstellt. Deshalb sind reine 2D-Simulationen einer Zylinderumströmung von vornherein mit einer gewissen Vorsicht zu interpretieren [15, 16]. Die vorliegenden Simulationen sind daher nur die ersten Schritte in einer umfangreicheren Kampagne, in deren Verlauf auch detaillierte 3D-Simulationen geplant sind.

Literatur

[1] Lockard, D.: Summary of the tandem cylinder solutions from the benchmark problems for airframe noise computations-I workshop. In: 49th AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition, AIAA paper 2011-353 (2011)

[2] Khorrami, M. R., Choudhari, M. M., Lockard, D. P., Jenkins, L. N., McGinley, C. B.: Unsteady flowfield around tandem cylinders as prototype component interaction in airframe noise. AIAA Journal, 45(8), (2007) 1930-1941

[3] Lockard, D., Khorrami, M., Choudhari, M., Hutcheson, F., Brooks, T., Stead, D.: Tandem cylinder noise predictions. In: 13th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, AIAA paper 2007-3450) (2007)

[4] Bres, G. A., Freed, D., Wessels, M., Noelting, S., Pérot, F.: Flow and noise predictions for the tandem cylinder aeroacoustic benchmark. Physics of Fluids, 24(3) (2012)

[5] Hutcheson, F. V., Brooks, T. F., Lockard, D. P., Choudhari, M. M., Stead, D. J.: Acoustics and surface pressure measurements from tandem cylinder configurations. In: 20th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, AIAA paper 2014-2762 (2014)

[6] Geyer, T. F., Sarradj, E.: Circular cylinders with soft porous cover for flow noise reduction. Experiments in Fluids, 57(3) (2016), 1-16

[7] Geyer, T. F.: Experimental evaluation of cylinder vortex shedding noise reduction using porous material. Experiments in Fluids, 61(153) (2020)

[8] Geyer, T. F.: Vortex shedding noise from finite, wall-mounted, circular cylinders modified with porous material. AIAA Journal, 58/5 (2020), 2014-2028

[9] Arcondoulis, E. J. G., Geyer, T. F., , Liu, Y.: An acoustic investigation of non-uniformly structured porous coated cylinders in uniform flow. The Journal of the Acoustical Society of America, 150 (2021)

[10] Geyer, T. F., Arcondoulis, E., Yu, L.: Experimental investigation of noise generation by porous coated tandem cylinder configurations. In: 27th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, AIAA paper 2021-2266 (2021)

[11] Liu, H., Azarpeyvand, M., Wei, J., Qu, Z.: Tandem cylinder aerodynamic sound control using porous coating. Journal of Sound and Vibration 334 (2015), 190-201

[12] Liu, H., Wang, Y., Wei, J., Qu, Z.: The importance of controlling the upstream body wake in tandem cylinders system for noise reduction. Journal of Aerospace Engineering, 232(3) (2018), 517-531

[13] Sarradj, E., Fritzsche, C., Geyer, T. F., Giesler, J.: Acoustic and aerodynamic design and characterization of a small-scale aeroacoustic wind tunnel. Applied Acoustics, 70 (2009), 1073–1080

[14] DIN EN ISO 9053-1:2019-03, Akustik - Bestimmung des Strömungswiderstandes - Teil 1: Verfahren mit statischer Luftströmung (ISO 9053-1:2018)

[15] Travin, A., Shur, M., Strelets, M., Spalart, P.: Detached-eddy simulations past a circular cylinder. Flow, turbulence and combustion, 63(1) (2000), 293-313

[16] Geyer, T. F., Sharma, S., Sarradj, E.: Detached Eddy Simulation of the flow noise generation of cylinders with porous cover. In: 24th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, AIAA paper 2018-3472 (2018)