Einfluss von Schutzgittern auf die Akustik von Axialventilatoren

Marc Schneider, Andreas Lucius, Ramsubramanian Pazhanisamy

ebm-papst Mulfingen GmbH & Co. KG, 74673 Mulfingen, marc.schneider@de.ebmpapst.com

Einleitung

Ventilatoren werden heutzutage in vielen Anwendungen in unmittelbarer Nähe zu Menschen eingesetzt. Um ein Hineingreifen in den rotierenden Ventilator zu verhindern, werden Schutzgitter verwendet.

In dieser Arbeit wird der akustische Einfluss von druckseitig eines Axialventilators angebrachten Schutzgittern experimentell und numerisch untersucht. Diese zeigen in Abhängigkeit der Geometrie eine deutliche Geräuschüberhöhung gegenüber der „Ventilator alleine“ Messung.

Es zeigt sich, dass der Einfluss der Schutzgitterringe grundsätzlich gut mit dem Phänomen der Kármánschen Wirbelstraße erklärt werden kann. Darüber hinaus spielen weitere Effekte eine wichtige Rolle.

U.a. durch den Einsatz numerischer Methoden (CFD, CAA) wird ein semiempirisches Modell zur Berechnung der Schutzgitterakustik entwickelt.

Motivation und Ausgangssituation

Die Schutzgitter bestehen aus einer Tragkonstruktion aus radial verlaufenden Streben und einer Vielzahl daran befestigter umfänglicher Gitterringe mit rundem Querschnitt (D = 3,0 mm; s. Abbildung 1).

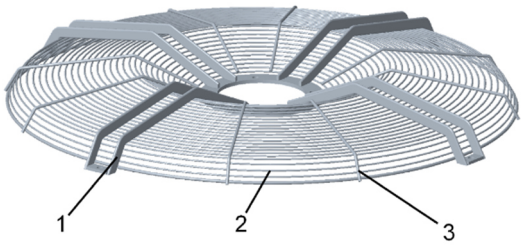

Abbildung 1: Druckseitiges Schutzgitter eines Axialventilators (1: Hauptstreben, 2: Gitterringe, 3: Versteifungsstreben)

Abb. 2 zeigt die aerodynamischen und akustischen Kennlinien eines Axialventilators (Da = 800 mm) mit und ohne Schutzgitter (SG). Man erkennt, dass das Schutzgitter (rot) sowohl eine Reduktion der Luftleistung als auch eine Erhöhung der Schallleistung über den gesamten Kennlinienbereich bewirkt. Spektral macht sich das in einer breitbandigen Überhöhung im Frequenzbereich von f = 800 – 1600 Hz bemerkbar (s. Abb. 3: Terzbandspektrum Optimalpunkt).

An den Gitterringen, die als gebogene Kreiszylinder ausgeführt sind und sich in der Ventilatorabstömung befinden, tritt das Phänomen der Kármánschen Wirbelstraße auf. Dabei kann die Frequenz der Wirbelablösung aus Gl. (1) mit einer Strouhal-Zahl Sr ≈ 0,21 bestimmt werden, die sich nach Abb. 4 bei einer typischen Reynolds-Zahl von Re ≈ 4000 ergibt (mit v = 20 m/s, D = 3 mm).

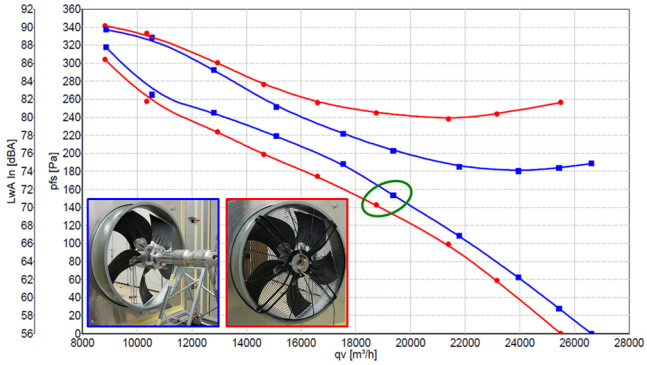

Abbildung 2: Aerodynamische und akustische (LwA In: saugseitige Schallleistung, A-bew.) Kennlinien eines Axialventilators (Durchmesser Da = 800 mm) ohne (blau) und mit (rot) druckseitigem Schutzgitter

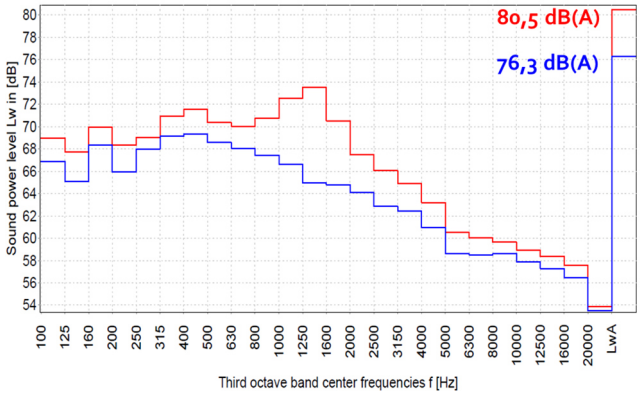

Abbildung 3: Terzbandspektren (unbew.) des in Abb. 2 markierten Optimalpunkts (grüne Ellipse) des Axialventilators ohne (blau) und mit (rot) Schutzgitter

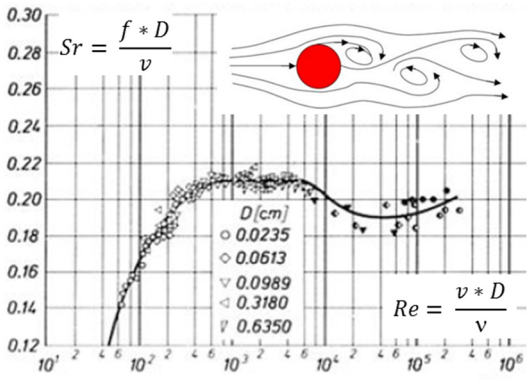

Abbildung 4: Strouhal-Zahl Sr (f: Frequenz) in Abhängigkeit der Reynolds-Zahl Re (ν : kinematische Viskosität) eines mit der Geschwindigkeit v angeströmten Zylinders (D: Durchmesser); nach [1] [2]

Die Strouhal-Zahl ergibt sich aus:

$$Sr = \frac{f * D}{v} \tag{1}$$

Darin ist f die Frequenz, D der Zylinderdurchmesser und v die Anströmgeschwindigkeit.

Semiempirisches Modell

Die Schallleistung eines umströmten Zylinders der Länge l kann nach [3] berechnet werden aus:

$$P_{ak} = \frac{\pi * \rho * l * v^6 * Sr^2 * \overline{C_L'^2} * l_c}{12 * a^3} \tag{2}$$

mit der Luftdichte ρ, der Strouhal-Zahl Sr nach Gl. (1), der Schwankung des Auftriebsbeiwerts C_L', der Korrelationslänge l_c und der Schallgeschwindigkeit a.

In einem semiempirischen Modell wird die Schallleistung jedes SG Rings abschnittsweise berechnet, indem die entsprechenden Parameter einer CFD RANS Simulation ohne SG entnommen werden, wobei das Abströmfeld auf einer Länge von 120 mm mit ca. 10 mm Auflösung diskretisiert wird, sodass damit unterschiedliche SG Geometrien berechnet werden können. Die einzelnen Gitterabschnitte werden dabei als nach unten geöffnete Parabel modelliert (s. Abb. 5). Dabei ergibt sich die Variation in der Frequenz aufgrund der ungleichförmigen Zuströmung (s. Abb. 6, links).

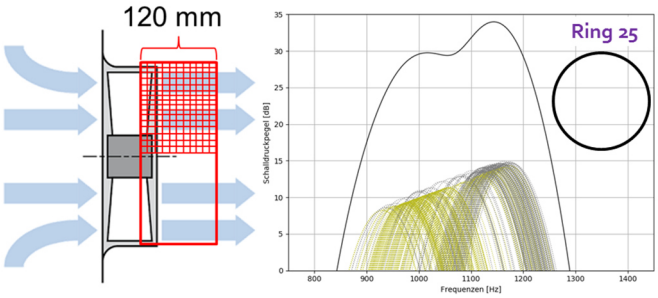

Abbildung 5: Diskretisierung des Abströmfelds eines Axialventilators in der CFD (links); abschnittsweise Berechnung der spektralen Schallabstrahlung eines Schutzgitterrings nach Gl. (2)

Der Gesamtbeitrag durch die Wirbelablösung an den SG Ringen ergibt sich durch logarithmische Summierung der Geräuschbeiträge aller Einzelringe. Dabei werden die Effekte der Tragkonstruktion und Versteifungsstreben nicht berücksichtigt.

Im Folgenden werden weitere wichtige Effekte beschrieben, die für die Schallabstrahlung der Schutzgitter relevant sind und deshalb im Modell berücksichtigt werden müssen.

Ungleichförmigkeit der Zuströmung

Abb. 6 (links) zeigt eine typische abströmseitige Geschwindigkeitsverteilung eines Axialventilators in einer relevanten Ebene. Man erkennt den Einfluss der 5 Schaufeln auf die umfängliche Verteilung. Mit einer umfänglich gemittelten Geschwindigkeit für den hier betrachten Einzelring (Ring 25) ergibt sich mit dem Modell die hellblaue nach unten geöffnete Parabel. Erst die Berücksichtigung der Ungleichförmigkeit der Zuströmung zum Schutzgitter (schwarze Kurve) liefert Schallanteile bei deutlich höheren Frequenzen, die auch in einem entsprechenden Versuch mit einem Einzelring (blaugrüne Punkte als logarithmische Differenz zwischen mit und ohne Ring) gemessen werden (s. Abb. 6, rechts).

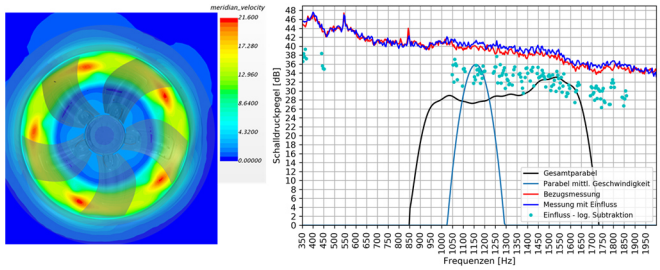

Abbildung 6: Abströmseitige Geschwindigkeitsverteilung eines Axialventilators (links); Schallabstrahlung eines Ringes (blaugrüne Punkte) als logarithmische Differenz (blau-rot), Berechnung nach Gl. (2) mit ungleichförmigem (schwarz) und umfänglich gemittelten (hellblau) Geschwindigkeitsfeld (rechts)

Interaktion von Zylindern

Die Interaktion von zwei umströmten Zylindern unter Variation des Winkels α und des Abstands P wird in [4] untersucht (s. Abb. 7). Dabei ergibt sich ein Maximum der auf dem stromabwärtigen Zylinder gemessenen Schwankung des Auftriebsbeiwerts C_L' für $P^* > 3$ und $\alpha = 25°$ (s. Abb. 8).

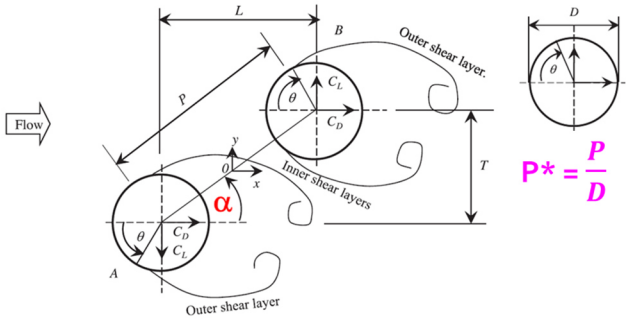

Abbildung 7: Tandemanordnung zweier Zylinder (Durchmesser D) in einer Strömung; Definition des dimensionslosen Abstands P^* [4]

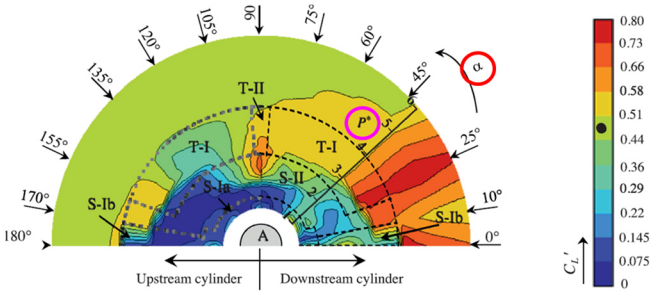

Abbildung 8: Schwankung des Auftriebsbeiwerts C_L' einer Tandem-Zylinder-Anordnung in Abhängigkeit des Winkels α und des dimensionslosen Abstands P^* (s. Abb. 7) [4]

Nach dem Diagramm in Abb. 6 ergibt sich für ungünstige Winkel $\alpha \approx 20 - 30°$ ein Faktor der Schwankung des Auftriebsbeiwerts C_L' in der Größenordnung 2 zum mittleren Wert. Daraus resultiert nach Gl. (2) mit $P_{ak} \sim C_L'^2$ ein Geräuschanstieg von 6 dB. Abb. 9 zeigt die Ringanordnung dreier unterschiedlicher Schutzgitter. Dabei weisen die SGs 15805 (grün) und 32805 (blau) im Außenbereich Ringe auf, die unter einem Winkel von $\alpha = 30°$ zueinander stehen.

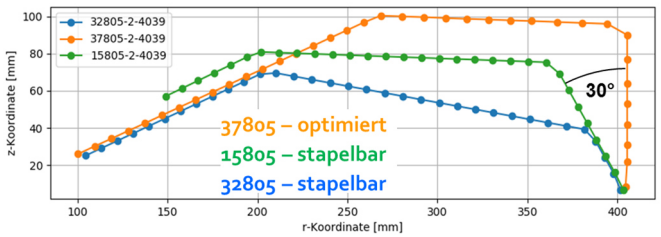

Abbildung 9: Ringanordnung dreier unterschiedlicher Schutzgitter

In Abb. 10 (rechts) erkennt man, dass insbesondere die durch die grüne Ellipse gekennzeichneten Ringe des SG 15805 als kritisch anzusehen sind, weil sie sich im Maximum der Abstömgeschwindigkeit befinden. Daraus resultiert wahrscheinlich der deutliche Schallpegelanstieg gegenüber dem SG 32805 (blau, s. Abb. 10, links).

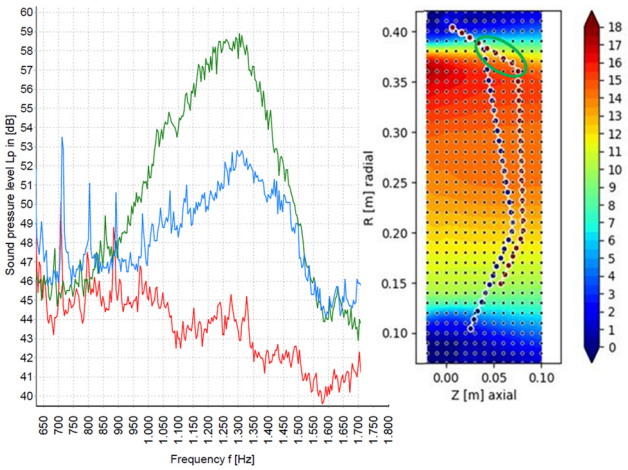

Abbildung 10: Geräuscherhöhung des SG 15805 (grün) gegenüber dem SG 32805 (blau) aufgrund relevanter Strömungsgeschwindigkeiten an interagierenden Zylindern (rechts, grüne Ellipse); rote Kennlinie: Messung ohne SG

Zuströmturbulenz

Da das Ventilatorabströmfeld aufgrund der Schaufelumströmung turbulent ist, muss die Zuströmturbulenz zum Schutzgitter berücksichtigt werden. Dazu wird das nach Gershfeld korrigierte Amiet-Modell verwendet [5] [6]:

$$L_{p,\,hf} = 10\,lg\left[\left(e^{\frac{-\pi f l}{u}}\right)\left(\frac{\Lambda\,\Delta h}{r^2}\,Ma^5\,Tu^2\,\frac{k_1^3}{(1+k_1^2)^{7/3}}\right)\right] + 181{,}3 \qquad (3)$$

Dabei können die Parameter Turbulenzgrad Tu und Turbulentes Längenmaß Λ ebenfalls RANS Simulationen entnommen werden. Da das Modell ursprünglich für Tragflügelprofile (und nicht für Zylinder) entwickelt wurde, werden LES Simulationen von einfachen Zylinderanordnungen (Einzelzylinder, 3 Zylinder unter Winkelvariation) zur Überprüfung und Kalibrierung des Modells durchgeführt. Dabei wird die Zuströmstörung gezielt durch die ALF Methode (ALF = Anisotropic Linear Forcing) eingebracht (s. Abb. 11).

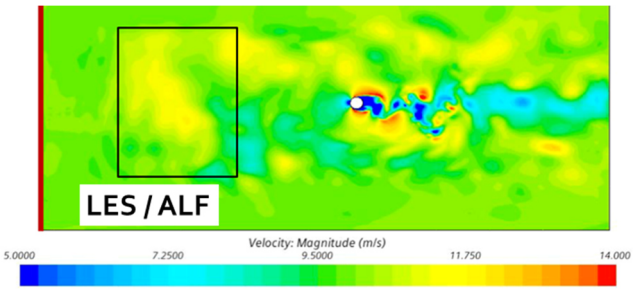

Abbildung 11: LES Simulation der Umströmung eines Zylinders; Berücksichtigung der Turbulenz durch ALF (Anisotropic Linear Forcing, schwarzes Rechteck)

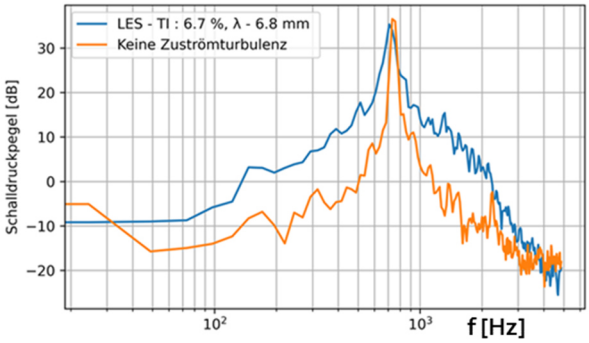

Abbildung 12: Berechnung der Schallabstrahlung eines Zylinders mittels LES: ohne (orange) und mit (blau, Parameter: s. Legende) Zuströmturbulenz

Abb. 12 zeigt mittels LES berechnete Schalldruckspektren: ohne Zuströmturbulenz (orange) ergibt sich ein schmalbandiger Peak nach Gl. (1). Die Berücksichtigung von typischen Turbulenzparametern führt zu einer Verbreiterung dieses Peaks und zu einer breitbandigen Geräuschanhebung bei tieferen und höheren Frequenzen (blaue Kurve).

Insbesondere weil es sich bei den Schutzgitterringen um kleine, aerodynamisch kompakte Geometrien (D = 3 mm) gegenüber den größeren turbulenten Strukturen (Längenmaß $\Lambda \approx$ 5-15 mm) handelt, ist eine Korrektur des Modells für niedrige Frequenzen erforderlich. Dazu wird eine LF-Korrektur (LF = Low Frequency) in Anlehnung an [7] verwendet. Dabei werden die LES Simulationen (s.o.) zur Kalibrierung dieses Modells benutzt, welches ebenfalls eigentlich für kompakte Tragflügelprofile entwickelt wurde.

In Abb. 13 ist der Einfluss der Zuströmturbulenz (Turbulenzgrößen aus RANS Abströmfeld) als gelbe Linie im Terzbandspektrum dargestellt. Man erkennt, dass sich links und rechts des im mittleren Frequenzbereich (f = 1000 – 1250 Hz) dominierenden Wirbelstraßeneinfluss (schwarz) relevante Schallpegel ergeben, die die Messung „ohne SG“ (rot) erhöhen, so dass die resultierende Gesamtvorhersage (grün) auch spektral gut mit der Messung „mit SG“ (blau) übereinstimmt.

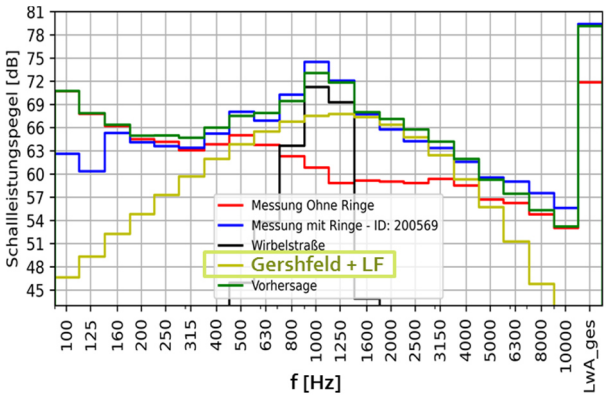

Abbildung 13: Berechnung des Terzbandspektrums mit SG (grün) als Summe aus Wirbelstraßeneinfluss (schwarz), Zuströmturbulenz (gelb, LF: Low Frequency correction nach [7]) und Messung „ohne SG“ (rot) im Vergleich zur Messung „mit SG“ (blau)

Vergleich Berechnung (Modell) und Messung

Der in Abb. 14 dargestellte Vergleich der akustischen Kennlinien (spezifischer A-bew. Schallleistungspegel) der drei in Abb. 9 dargestellten Schutzgitter über dem dimensionslosen Volumenstrom (*phi* = Volumenzahl) zeigt, dass durch das entwickelte semiempirische Modell zur Vorhersage der Schutzgitterakustik (unten) Trends der Messung (oben) auch über den gesamten Kennlinienbereich gut wiedergegeben werden.

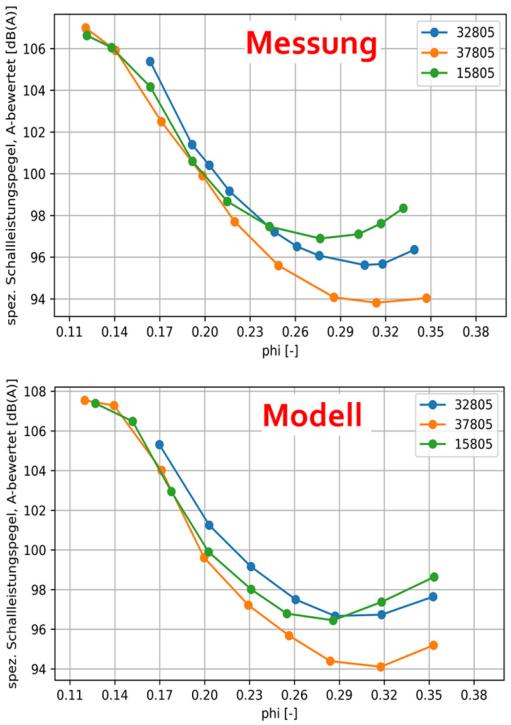

Abbildung 14: Vergleich der berechneten Kennlinien (unten) des spez. Schalleistungspegels (A-bew.) mit den Messungen (oben) für drei unterschiedliche Schutzgitter

Zusammenfassung und Ausblick

Es zeigt sich, dass der akustische Einfluss von druckseitig eines Axialventilators angebrachten Schutzgittern grundsätzlich gut mit dem Phänomen der Kármánschen Wirbelstraße erklärt werden kann. Darüber hinaus spielen aber weitere Effekte wie die Interaktion zwischen einzelnen Ringen, die Ungleichförmigkeit der Strömung hinter dem Ventilator sowie die damit in Verbindung stehende vom Ventilator (oder anderen Bauteilen wie beispielsweise eines saugseitig montierten Wärmetauschers) generierte Turbulenz eine wichtige Rolle.

Vor allem durch den Einsatz numerischer Methoden (CFD, CAA) inklusive der Berücksichtigung von Turbulenz konnte ein semiempirisches Modell zur Berechnung des akustischen Einflusses von Schutzgittern entwickelt werden, welches gemessene Trends von Gittern mit unterschiedlicher Geometrie gut beschreibt. Als wesentlicher Vorteil dabei hat sich die Verwendung von CFD Parametern aus (weniger aufwändigen) RANS Simulation ohne Schutzgitter ergeben.

Insbesondere der wichtige Einfluss der Interaktion zwischen den Ringen in Kombination mit einer Variation der Zuströmturbulenz soll in Windkanalmessungen weiter untersucht werden. Ziel davon ist die weitere Verbesserung des Modells, um es robust für akustische Schutzgitter-Optimierungen verwenden zu können.

Literatur

[1] Sr-Diagramm, URL: https://tu-freiberg.de/sites/ default/ files/media/institut-fuer-mechanik-und-fluiddynamik-15832/Lehre/lehrveranstaltungen/fluid/MT/technische_ durchflussmessung.pdf

[2] Kármánsche Wirbelstraße, URL: https://www.researchgate.net/figure/Abbildung-1-Karmansche-Wirbelstrasse-im-Nachlauf-eines-Zylinders_fig1_309159900

[3] G. Müller, M. Möser: Taschenbuch der Technischen Akustik. Dritte, erweiterte und überarbeitete Auflage, Springer, 2004

[4] Y. Zhou, M. Alam: Wake of two interacting circular cylinders: A review. International Journal of Heat and Fluid Flow 62 (2016), 510-537

[5] R.K. Amiet: Acoustic radiation from an airfoil in a turbulent stream. Journal of Sound and Vibration 41(4), 407-420, 1975

[6] J. Gershfeld: Leading edge noise from thick foils in turbulent flows. Journal of the Acoustical Society of America 116, 1416-1426, 2004

[7] L. Santana, C. Schram, W. Desmet: Low-frequency extension of Amiet’s theory for compact airfoil noise predictions. International Journal of Sound and Vibration 372 (2016), 342-356