

Aerodynamische Schallentstehung durchströmter Netze

Thomas F. Geyer¹, Ennes Sarradj²

¹ Brandenburgische Technische Universität Cottbus - Senftenberg, 03046 Cottbus, Deutschland, Email: thomas.geyer@b-tu.de

² Technische Universität Berlin, 10587 Berlin, Deutschland

Einleitung

Gitter und Netze werden oftmals in aeroakustischen Versuchsständen benutzt, um die in der Strömung enthaltene Turbulenz zu mindern oder um eine gewünschte Turbulenz zu erzeugen. Das ist beispielsweise für die experimentelle Untersuchung der Schallerzeugung an der Vorderkante von Tragflügeln erforderlich (siehe zum Beispiel [1, 2]). Weitere Anwendungen von Netzen finden sich unter anderem im Bereich der Automobilindustrie als Windschotts für Cabriolets. Dabei kommt es durch den Einsatz solcher Stoffe zusätzlich zu einem Druckverlust sowie zur Entstehung aerodynamischen Schalls aufgrund der Durchströmung. Für die Vorhersage der durch die Netze erzeugten Turbulenz sowie für den erzeugten Druckverlust existiert eine Reihe von Arbeiten, die aufgrund ihrer Einfachheit und guten Übereinstimmung mit Messdaten in der Praxis häufig Verwendung finden [3, 4]. Auch wenn es einige Arbeiten zur Schallentstehung an umströmten Einzelhindernissen in Rohrströmungen gibt [5, 6, 7], finden sich zur Schallerzeugung durchströmter Netze jedoch nur sehr wenige Untersuchungen (zum Beispiel [8]).

Im vorliegenden Paper werden Ergebnisse einer umfangreichen experimentellen Studie vorgestellt, bei welcher die Schallentstehung einer Vielzahl durchströmter Netze unterschiedlicher Geometrie in einem Windkanal gemessen wurde. Die Bestimmung des Schalleistungspegels fand in Anlehnung an das Hüllflächenverfahren statt. Aus den an den insgesamt 42 untersuchten Netzen bei 15 Strömungsgeschwindigkeiten ermittelten Schalleistungspegelspektren in Terzbändern wurde schließlich ein vergleichsweise einfaches mathematisches Modell zur Abschätzung der Schallentstehung durchströmter Netze erstellt. Eine detailliertere Beschreibung der im Rahmen dieser Studie durchgeführten Experimente befindet sich in [9].

Messaufbau

Um eine möglichst große Datenbasis für das zu entwickelnde empirische Schallvorhersagemodell zu erhalten, wurde eine Vielzahl verschiedener Netzmaterialien mit Abmessungen von etwa $0,3 \text{ m} \times 0,4 \text{ m}$ beschafft. Dazu gehören zum Beispiel Gardinen, Mückennetze, Federballnetze, dünne Schaumstoffmatten und Tüll. Beispiele dieser Materialien sind in Bild 1 gezeigt.

Die Bestimmung der geometrischen Parameter der Netze (Fadenbreite b , Lochweite h , Porosität σ und Netzdicke t , siehe Bild 2) wurde entweder durch Messung mit einem Messschieber oder mit Hilfe von Bildverarbeitungssoftware an Scans der Netze durchgeführt. Eine Übersicht



Bild 1: Auswahl einiger der verwendeten Netze.

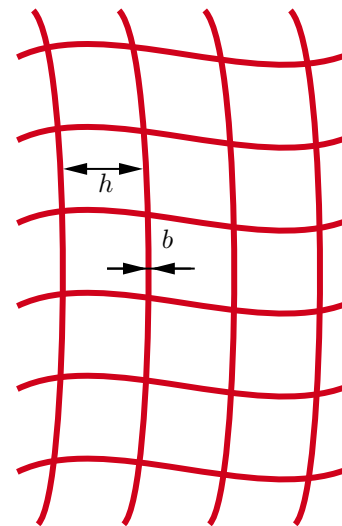


Bild 2: Schematische Darstellung eines Netzes (h ... Lochweite, b ... Fadenbreite).

der insgesamt 42 in der Studie verwendeten Netze ist in Tabelle 1 gegeben. Die Materialien sind dabei nach ihrer Porosität (in absteigender Reihenfolge) geordnet.

Alle Experimente fanden im kleinen aeroakustischen Freistrahwindkanal der BTU Cottbus-Senftenberg [10] unter Verwendung einer Düse mit rechteckigem Austrittsquerschnitt von $0,2 \text{ m} \times 0,15 \text{ m}$ statt. Für die Messung wurden die Netze fest in einen Rahmen aus Kunststoff eingespannt, der an der Düse befestigt war.

In einem ersten Schritt erfolgte die Messung des durch die Netze verursachten Druckverlusts Δp mit Hilfe eines Differenzdruckaufnehmers. Dabei wurde der Druck direkt stromauf des Netzes an im Rahmen befindlichen umfänglichen Druckbohrungen und der Druck stromab des Netzes am statischen Druckeingang eines Prandtl-

Tabelle 1: Übersicht der verwendeten Netze.

Nr.	Porosität σ	Lochweite h in mm	Fadenbreite b in mm	Dicke t in mm
1	0,966	100,05	1,25	1,32
2	0,956	13,5	0,3	0,22
3	0,953	104,4	1,3	1,4
4	0,943	151,7	3,2	1,8
5	0,937	60,75	1,2	1,2
6	0,914	34,7	1,25	1,3
7	0,867	26	2,05	1
8	0,860	53,95	3,9	3,2
9	0,841	1,975	0,15	0,26
10	0,812	2,075	0,15	0,22
11	0,807	0,45	0,2	0,18
12	0,790	37,1	4,8	3
13	0,779	32,55	3,15	2,2
14	0,767	32,35	4,2	2,8
15	0,746	1,75	0,225	0,23
16	0,724	7,15	0,95	1,7
17	0,721	16,4	2,05	1,3
18	0,706	1,9	0,375	0,16
19	0,706	16,8	1,85	1,6
20	0,693	16,65	2,65	1,5
21	0,661	5,85	1,1	1,64
22	0,641	1,325	0,35	0,28
23	0,637	5,35	0,95	0,46
24	0,613	0,925	0,25	0,25
25	0,603	1,25	0,375	0,26
26	0,601	4,25	1,025	0,57
27	0,595	6,75	1,6	1,15
28	0,573	1,6	0,5	0,3
29	0,552	2,1	0,5	0,57
30	0,542	4,25	1,3	0,7
31	0,535	2,1	0,55	0,53
32	0,517	6,1	1,5	0,5
33	0,506	2,85	2,45	0,3
34	0,504	0,25	0,1	0,11
35	0,481	0,6	0,15	0,19
36	0,466	2,875	0,75	0,43
37	0,461	9,4	3,1	1,25
38	0,456	3,95	1,5	0,75
39	0,450	1	0,55	0,26
40	0,422	1,9	1,25	0,22
41	0,393	1,25	0,925	0,15
42	0,342	3,65	1,8	0,7

rohrs gemessen, welches direkt mittig vor dem Netz positioniert war. Bild 3 zeigt ein Foto des verwendeten Messaufbaus. Aus dem gemessenen Druckverlust wurde anschließend durch Normierung mit dem statischen Druck der Druckverlustbeiwert

$$\zeta = \frac{2 \cdot \Delta p}{\rho \cdot U^2} \quad (1)$$

berechnet. Die Messungen fanden bei Strömungsgeschwindigkeiten von $U = 10$ m/s bis 50 m/s in Schritten von 2,5 m/s statt. Da einige der Materialien deutliche Unterschiede zwischen Vorderseite und Rückseite aufweisen, wurden alle Netze von beiden Seiten durchströmt und vermessen.

Die Messung der Schallentstehung an den durchströmten Netzen erfolgte in einem zweiten Schritt. Dazu wurden acht Viertelzoll-Freifeldmikrofone verwendet, die sich auf einer halbkugelförmigen Hüllfläche mit einem Radius von $r = 0,8$ m (bezogen auf den Mittelpunkt des Netzes) und außerhalb der Strömung befanden (siehe Bild 4). Die Daten wurden mit einer Abtastfrequenz von 51,2 kHz und einer Zeitdauer von 40 s aufgezeichnet. Aus den über die Hüllfläche gemittelten Schalldruckpegeln \bar{L}_p wurde schließlich ein auf die Netzfläche S (entspricht der Düsenaustrittsfläche) bezogener unbewerteter Schallei-

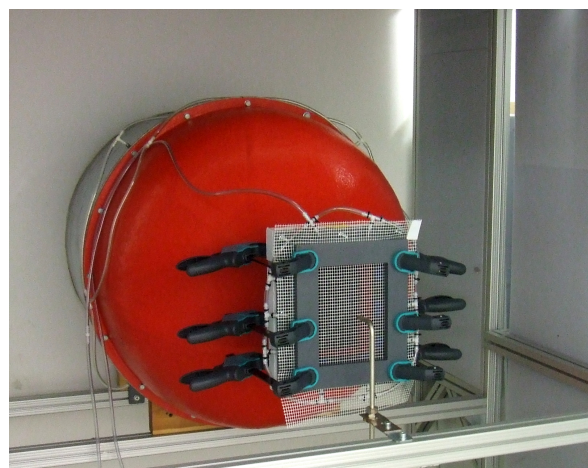


Bild 3: Messaufbau zur Bestimmung des Druckverlusts.

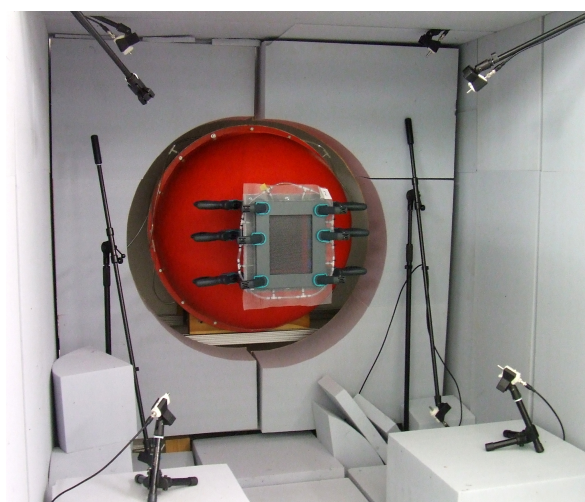


Bild 4: Messaufbau zur Bestimmung der Schalleistung.

stungspegel

$$L_{W,S} = \bar{L}_p + 10 \log_{10} \left(\frac{2\pi r^2}{1 \text{ m}^2} \right) \text{ dB} - 10 \log_{10} \left(\frac{S}{1 \text{ m}^2} \right) \text{ dB} \quad (2)$$

berechnet.

Messergebnisse

Der vorliegende Beitrag konzentriert sich auf die im Rahmen der Studie durchgeführten akustischen Messungen sowie die nachfolgende Modellbildung. Die Ergebnisse der Druckverlustmessungen sind in [9] zu finden.

Um die Schallentstehung an den durchströmten Netzen untersuchen zu können, wurde zuerst der flächenbezogene Schalleistungspegel des Freistrahls bestimmt, welcher das Hintergrundgeräusch und damit die untere Messgrenze darstellt. Das Ergebnis ist in Bild 5 dargestellt, wobei aus Gründen der Übersichtlichkeit nur Spektren für jede zweite Geschwindigkeit gezeigt werden.

Bild 6 zeigt dann exemplarisch die flächenbezogenen Schalleistungsspektralspektren für zwei Netze. Das erste Netz (Netz 23, Bild 6(a)) besitzt eine Porosität von 63,7 %, eine Lochweite von 5,35 mm und eine Stre-

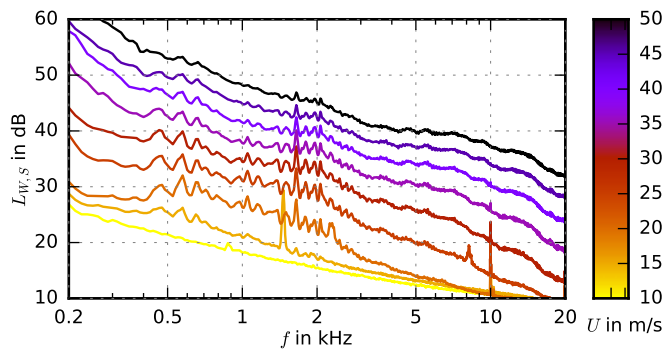
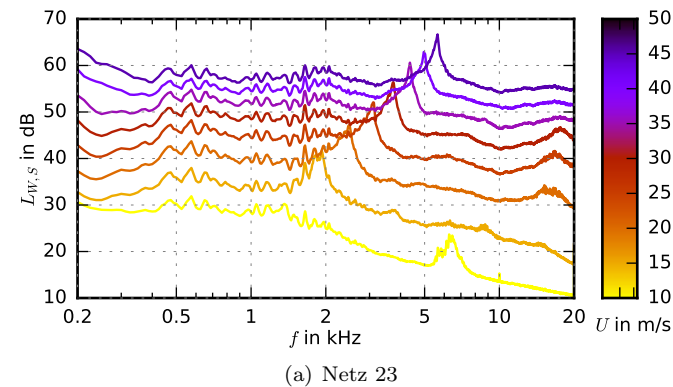
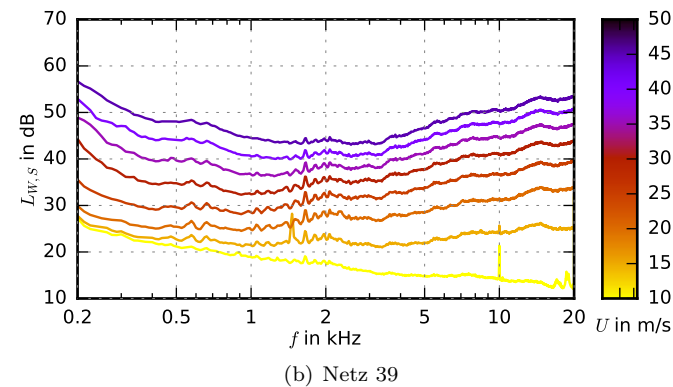


Bild 5: Schmalbandspektrum des flächenbezogenen Schalleistungspegels des Freistrahls.



(a) Netz 23



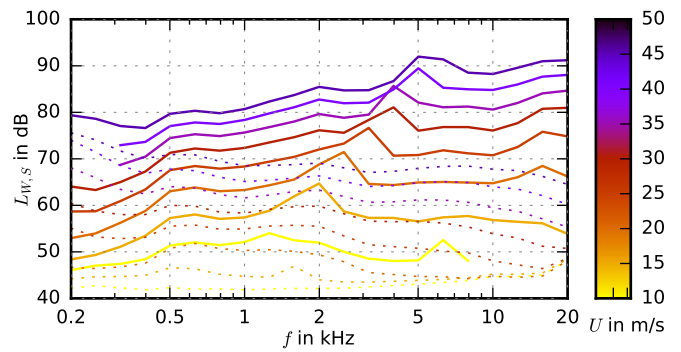
(b) Netz 39

Bild 6: Schmalbandspektren des flächenbezogenen Schalleistungspegels zweier Netze.

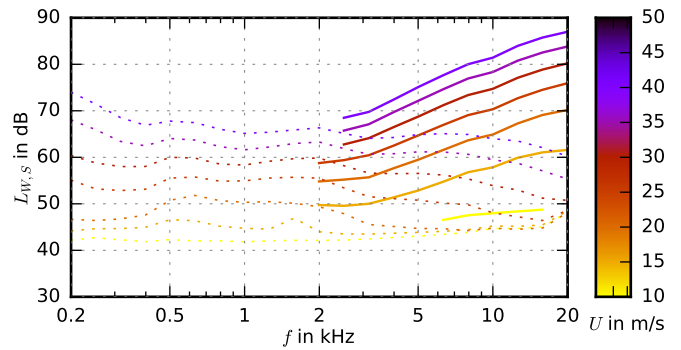
benbreite von 0,95 mm. Im Spektrum sind deutlich tonale Schallanteile erkennbar, die durch die regelmäßige Wirbelablösung an den umströmten Fäden entstehen. Im Spektrum des zweiten Materials (Netz 39, Bild 6(b)), welches eine Porosität von 45,0 %, eine Lochweite von 1,0 mm und eine Strebenbreite von 0,55 mm aufweist, zeigen sich aufgrund des deutlich dünneren Fadens keine schmalbandigen Anteile im untersuchten Frequenzbereich.

Modellbildung

Für die Modellbildung wurden die gemessenen Schmalbandspektren in Terzbandspektren umgewandelt. Anschließend wurden alle diejenigen Pegel verworfen, die nicht mindestens 3 dB über dem Hintergrundgeräusch, also dem Terzbandspektrum des Freistrahls, liegen. Das führt für Materialien, die nur eine geringe Schallentste-



(a) Netz 23



(b) Netz 39

Bild 7: Korrigierte Terzbandspektren des flächenbezogenen Schalleistungspegels zweier Netze (durchgezogene Linien: korrigierter Schalleistungspegel der Netze, gestrichelte Linien: Schalleistungspegel des Freistrahls).

hung verursachen, zu eingeschränkten Frequenzbereichen mit gültigen Ergebnissen. Dieser Effekt wird in Bild 7 anhand der korrigierten Terzbandspektren für die zwei Netze aus Bild 6 deutlich: Während Netz 23 fast im gesamten Frequenz- und Geschwindigkeitsbereich zu gültigen Pegelwerten führt, weist Netz 39 nur bei hohen Frequenzen oberhalb von etwa 2 kHz gültige Werte auf. Bei tiefen Frequenzen liegen die flächenbezogenen Terzschalleistungspegel für dieses Netz nicht ausreichend über denen des Freistrahls.

Anschließend wurde ein empirisches Modell gesucht, welches die Vorhersage der Schallentstehung durchströmter Netze ermöglicht. Das wurde durch Verwendung der symbolischen Regression erreicht (siehe, zum Beispiel, [11]). Bei dieser Methode werden mathematische Funktionen zur Beschreibung von Daten identifiziert, die durch eine der biologischen Evolution entlehnten genetischen Programmierung aus einem vorgegebenen Vorrat von Ausgangsfunktionen entstehen. Die bei der symbolischen Regression resultierenden mathematischen Funktionen unterscheiden sich dann sowohl in ihrer Genauigkeit als auch in ihrer Komplexität. Eine wesentliche Aufgabe besteht dann vor allem darin, physikalisch sinnvolle Modelle auszuwählen.

In der vorliegenden Studie wurde ein wenig komplexes, dafür aber physikalisch verständliches Modell der Form

$$P/S = g(\underbrace{b, h, t, \sigma}_{\text{Netzgeometrie}}, U, c, \rho, \zeta, f_m, \dots) \quad (3)$$

gesucht. Die flächenbezogene Schalleistung der Netze soll sich also aus den geometrischen Parametern der Netze (b , h , t , σ , siehe Tabelle 1), aus den Parametern des Fluids (Strömungsgeschwindigkeit U , Schallgeschwindigkeit c , Dichte ρ), aus dem Druckverlustkoeffizienten sowie aus der Terzmittenfrequenz f_m ergeben.

Um überhaupt sinnvolle Ergebnisse erhalten zu können, sollten die Eingangsdaten bei der Methode der symbolischen Regression zudem in dimensionslose Kennzahlen umgewandelt werden. Hier wurden dafür die Machzahl $M = U/c$, der in den Druckmessungen bestimmte Druckverlustkoeffizient ζ , eine auf die Fadenbreite bezogene Strouhalzahl $Sr_b = b f_m/U$ sowie normierte Dimensionen verwendet. Aus der Vielzahl der sich ergebenden Lösungen wurde schließlich ein Modell der Form

$$P \propto B_1^{n_1} B_2^{n_2} B_3^{n_3} \dots \quad (4)$$

gesucht, bei welchem die Schalleistung als proportional zum Produkt der mit verschiedenen Exponenten versehenen Betriebsparameter B_i angenommen wird. Ein derartiges Modell erlaubt trotz seiner Einfachheit die Identifikation der hinsichtlich der Schallentstehung wesentlichen Parameter und damit in der praktischen Anwendung eine möglichst effektive Lärminderung.

Das letztlich gewählte, vergleichsweise einfache empirische Modell hat die Form

$$L_{W,S} = 56,7 \log_{10} M + 3,6 \log_{10} \zeta + 2,2 \log_{10} Sr_b + 133,5 \text{ dB.} \quad (5)$$

Es zeigt eine Abhängigkeit von der 5,7ten Potenz der Machzahl, was in etwa der Strömungsgeschwindigkeitsabhängigkeit einer Dipol-schallquelle entspricht. Darüber hinaus impliziert es eine nur sehr geringe Abhängigkeit der Schallentstehung vom Druckverlustkoeffizienten sowie von der Strouhalzahl. Dementsprechend ist das Modell kaum in der Lage, schmalbandige Anteile im Schalleistungsspektrum, die durch die Umströmung der Fäden entstehen, korrekt vorherzusagen, sondern es eignet sich eher zu einer groben Abschätzung des Spektrums. Der mittlere absolute Fehler beträgt 3,7 dB.

In Bild 8 werden die gemessenen Terzschalleistungspegelwerte den vorhergesagten gegenübergestellt. Es ist ersichtlich, dass das Modell für Netze mit hoher Porosität und großen Lochweiten bessere Ergebnisse erzielt als für Netze mit kleinen Maschen und geringer Porosität.

Danksagung

Die Autoren danken Herrn Daniel Materne und Herrn Willi Poppe (beide BTU C-S) für ihre Hilfe bei den Messungen.

Literatur

[1] Geyer, T. F., Sarradj, E., Giesler, J.: Application of a beamforming technique to the measurement of airfoil leading edge noise. *Advances in Acoustics and Vibration* (2012)

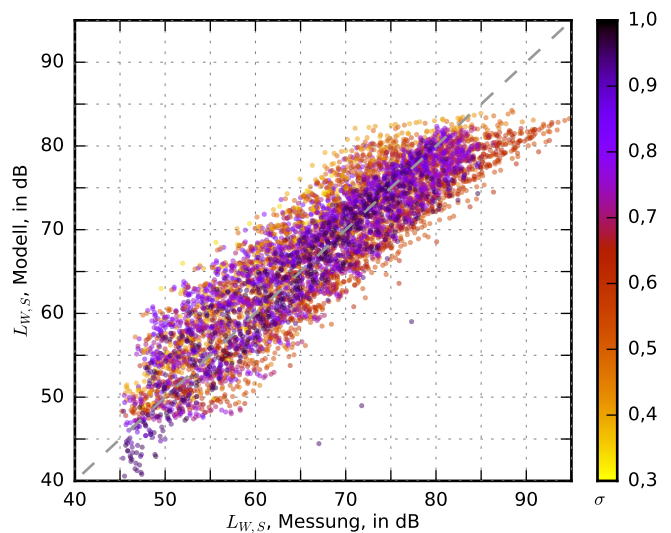


Bild 8: Gegenüberstellung gemessener und mit Gleichung (5) vorhergesagter flächenbezogener Schalleistungspegel.

- [2] Ocker, C., Geyer, T. F., Czwiolong, F., Krömer, F., Pannert, W., Merkel, M., Becker, S.: Permeable Leading Edges for Airfoil and Fan Noise Reduction in Disturbed Inflow. *AIAA Journal*, 59(12) (2021), 4969-4986
- [3] Scheiman, J., Brooks, J. D.: Comparison of experimental and theoretical turbulence reduction from screens, honeycomb, and honeycomb-screen combinations. *Journal of Aircraft*, 18(8) (1981), 638-643
- [4] Roach, P. E.: The generation of nearly isotropic turbulence by means of grids. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 8(2) (1987), 82-92
- [5] Gordon, C. G.: Spoiler-Generated Flow Noise. I. The Experiment. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 43(5) (1968), 1041-1048
- [6] Gordon, C. G.: Spoiler-Generated Flow Noise. II. Results. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 45(1) (1969), 214-223
- [7] Mak, C. M., Wu, J., Ye, C., Yang, J.: Flow noise from spoilers in ducts. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 125(6) (2009), 3756-3765
- [8] Bowen, L., Celik, A., Azarpeyvand, M., da Silva, C. R. I.: Grid Generated Turbulence for Aeroacoustic Facility. *AIAA Journal*, 60(3) (2021), 1-15
- [9] Geyer, T. F., Poppe, W., Sarradj, E.: Measurement of flow noise generation and pressure loss of nets and screens. *Applied Acoustics*, 134 (2018), 69-74
- [10] 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(8) (2009), 1073-1080
- [11] Sarradj, E., Geyer, T. F.: Symbolic regression modeling of noise generation at porous airfoils. *Journal of Sound and Vibration*, 333(14) (2014), 3189-3202