

Experimentelle Untersuchung aeroakustischer Effekte am Beispiel einer Zylinder/Platte-Konfiguration

Michael Winkler¹, Klaus Becker¹, Frank Kameier²

¹ Fachhochschule Köln, Institut für Fahrzeugtechnik, 50679 Köln, Deutschland, E-Mail: michael.winkler@fh-koeln.de

² Fachhochschule Düsseldorf, Fachbereich Maschinenbau und Verfahrenstechnik, 40474 Düsseldorf, Deutschland

Einleitung

Im Allgemeinen erzeugen Körper in Strömungen Schalldruckschwankungen. In besonderem Maße kommt es zu einer Verstärkung, wenn sich ein Körper im Nachlauf eines anderen Körpers befindet [1]. Dieser Zusammenhang wird am Beispiel einer ebenen Platte im Nachlauf eines Kreiszyinders bei kleinen Mach-Zahlen untersucht. Besonderes Interesse gilt hierbei der Entstehung von örtlichen Druckschwankungen durch das Auftreffen der Wirbel auf die Plattenoberfläche. Die dadurch zwischen Plattenstruktur und Fluid entstehenden Kräfte werden zur Berechnung der Schallabstrahlung mittels einer aeroakustischen Analogie verwendet. Auf Grundlage des Vergleichs von gemessenen und berechneten Schalldruckpegeln sollen die, auf die Platte wirkenden Kräfte als wesentliche Einflussgröße für die Schalldruckverstärkung identifiziert werden.

Theorie

Nach Curle [2] kann die Schallabstrahlung eines starren und unbewegten Körpers in einer langsamen Unterschallströmung als Gradient des Oberflächendruckintegrals angegeben werden.

$$4\pi c_0^2 (\rho(\vec{x}, t) - \rho_0) = \frac{\partial}{\partial x_i} \int_S \frac{l_i}{r} [p \delta_{ij}] dS(\vec{y}) \quad (1)$$

In dieser Gleichung sind c_0 die Schallausbreitungsgeschwindigkeit, ρ_0 die Dichte des ruhenden Fluids und $\rho(\vec{x}, t)$ die Dichteschwankung. Der Vektor \vec{y} beschreibt einen Punkt auf der starren Oberfläche S im Abstand r vom Beobachtungspunkt, der durch den Vektor \vec{x} gegeben ist. Bei l_i handelt es sich um die Vektorkomponenten des Einheitsvektors senkrecht zur Oberfläche. Der Druck p multipliziert mit dem Kronecker-Delta δ_{ij} wird zur retardierten Zeit $t - r/c_0$ betrachtet. Sind die Abmessungen des Körpers klein gegenüber der erzeugten akustischen Wellenlänge und gegenüber dem Abstand zwischen Beobachtungs- und Quellpunkt vereinfacht sich Gleichung (1) zu

$$4\pi c_0^3 (\rho(\vec{x}, t) - \rho_0) = \frac{x_i}{r^2} \frac{\partial}{\partial t} F_i(t). \quad (2)$$

Hierin ist $F_i(t)$ das Integral des Drucks auf der Oberfläche des Körpers und stellt somit die insgesamt zwischen Körper und Fluid wirkende Kraft dar. Die von dieser Kraft verursachte Beschleunigung der Platte wird als Eingangsgröße zur Berechnung der Schallabstrahlung verwendet. Unter der Annahme harmonischer Kräfte

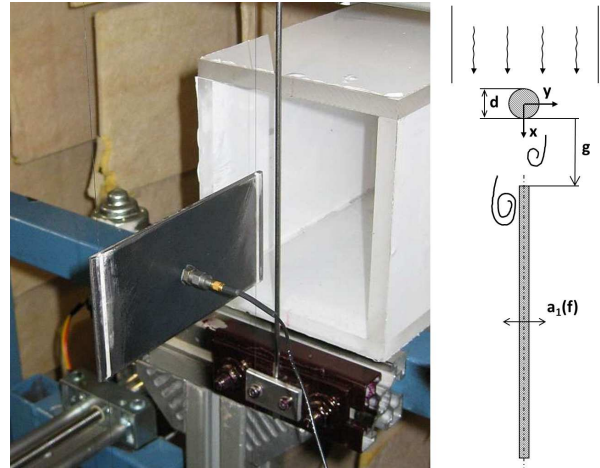


Abbildung 1: Fotografie des Versuchsaufbaus (links); Schematische Darstellung der Versuchskonfiguration (rechts);

$F_i(t) = \text{Re}(F_i e^{j\omega t})$ und Berücksichtigung der allgemeinen Abhängigkeit zwischen Schalldruck p' und Dichteschwankung ρ' ergibt sich im Frequenzbereich folgende Gleichung zur Berechnung des aeroakustisch erzeugten Schalldrucks.

$$p'(f) = \frac{k}{4\pi c_0 r} a_i(f) m_{\text{Platte}} \quad (3)$$

Dabei sind k die Wellenzahl, $a_i(f)$ die Beschleunigung und m_{Platte} die Masse, der in den Experimenten verwendeten Platte. Die Beschleunigung der Platte wird senkrecht zu den beiden größten Oberflächensegmenten gemessen. Die Anteile der viel kleineren Segmente sowie die Schallentstehung am Zylinder wird in den hier vorgestellten Untersuchungen vernachlässigt.

Versuchsaufbau

Als Versuchsumgebung dient ein reflexionsarmer Vollraum, in dem über einen rechteckigen Kanal (100x120 mm) ein Freistrahler erzeugt wird. In diesen Freistrahler wird die Versuchskonfiguration, bestehend aus Zylinder und Platte, eingebracht (Abb. 1). Im Nachlauf des Zylinders bilden sich Wirbel aus, die auf die dort befindliche ebene Platte auftreffen. Der Abstand zwischen Zylinder und Platte entspricht dem Vierfachen des Zylinderdurchmessers $d=3$ mm. Die verwendete Platte ist mit Stahlsaiten, welche in Nuten in der Plattenoberfläche eingebettet sind, befestigt. Die Stahlsaiten haben einen Durchmesser von $30 \mu\text{m}$ und beeinflussen die Messergebnisse unwesentlich.

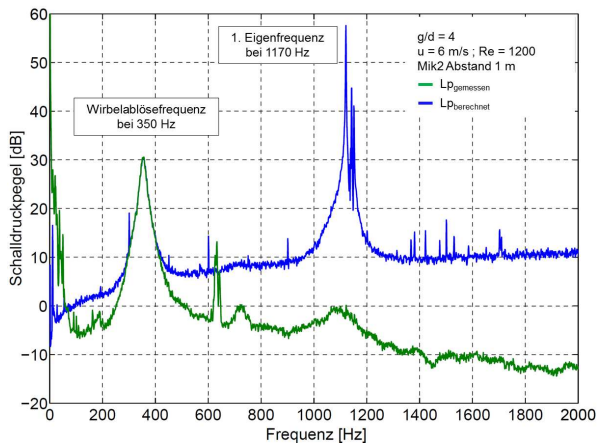


Abbildung 2: Vergleich von gemessenem und aus der Plattenbeschleunigung berechnetem Schalldruckpegel; $u = 6$ m/s; Mikrofonabstand 1 m

Die Platte ist aus Stahl gefertigt, hat die Abmaße $120\text{ mm} \times 60\text{ mm} \times 3\text{ mm}$ und eine Masse m_{Platte} von $0,1685\text{ kg}$. Die Strömungsgeschwindigkeiten u liegen zwischen 4 m/s und 30 m/s . Die Erfassung akustischer Daten erfolgt mittels eines $\frac{1}{2}$ Zoll ICP-Kondensatormikrofons, welches sich auf einer Achse mit dem mittig auf der Platte angebrachten Beschleunigungsaufnehmer in 1 m Entfernung zur Plattenoberfläche befindet.

Ergebnisse

Die Berechnung nach Gleichung (3) gilt für starre und unbewegte Körper. Die Platte ist jedoch nicht absolut starr, und bewegt sich aufgrund ihrer Strukturmechanik sowie einer nicht vollkommen starren Einspannung. Die Bewegung der Platte aufgrund der Einspannung ist erforderlich um eine Beschleunigung messen, und daraus die Kraft berechnen zu können. Die Größenordnung dieser Bewegung liegt jedoch im interessierenden Frequenzbereich bis 2000 Hz bei wenigen hundertstel Mikrometern und hat keinen Einfluss auf die Schallabstrahlung. Die Messung der Beschleunigung wird auch durch das strukturelle Verhalten der Platte beeinflusst. Aus diesem Grund wird die Strukturmechanik der Platte in einem Anschlagversuch bestimmt. Im interessierenden Frequenzbereich wird eine Eigenfrequenz bei 1170 Hz identifiziert.

In Abbildung 2 ist der Vergleich von berechnetem und gemessenem Schalldruckpegel dargestellt. Aufgrund der Strömungsgeschwindigkeit von 6 m/s ergibt sich eine Wirbelablösefrequenz von 350 Hz . Im Bereich der Wirbelablösefrequenz stimmen der basierend auf der Plattenbeschleunigung berechnete Schalldruckpegel und der am Mikrofon gemessene Schalldruckpegel nahezu überein. Zwischen 300 Hz und 400 Hz beträgt die maximale Abweichung lediglich $0,2\text{ dB}$. Außerhalb dieses Bereichs weichen die Schalldruckpegel voneinander ab. Hierfür gibt es mehrere Gründe. Bei 1170 Hz befindet sich eine Eigenfrequenz der Platte. In diesem Bereich wird die Beschleunigung aufgrund der Starrkörperbewegung der Platte von der Strukturmechanik überlagert und der berechnete Schalldruckpegel ist zu groß. Der wesentliche Grund

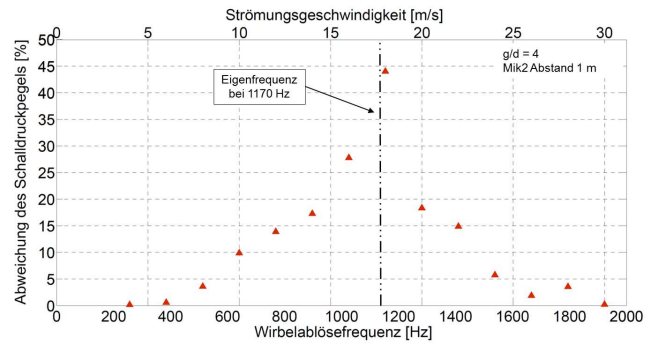


Abbildung 3: Abweichung von gemessenem und aus der Plattenbeschleunigung berechnetem Schalldruckpegel für verschiedene Strömungsgeschwindigkeiten.

für die Abweichung außerhalb des Bereichs der Wirbelablösefrequenz ist darin zu sehen, dass der Signal-Rauschabstand der Beschleunigungsmessung zu gering ist. Die Platte ist außerhalb des Bereichs der Wirbelablösefrequenz nicht die alleinige beziehungsweise dominierende Schallquelle, wodurch auch die Beschleunigungen entsprechend gering sind.

Um die Gültigkeit der getroffenen Aussagen zu überprüfen und den Einfluss der Strukturmechanik auf die Messung beziehungsweise die Berechnung zu untersuchen wird die Strömungsgeschwindigkeit variiert. Hierdurch verschiebt sich die Wirbelablösefrequenz und somit auch der, für die Auswertung interessante Bereich. In Abbildung 3 sind die Abweichungen zwischen berechnetem und gemessenem Schalldruckpegel an der Stelle der Wirbelablösefrequenz für verschiedene Strömungsgeschwindigkeiten aufgetragen. Befindet sich die Wirbelablösefrequenz im Einflussbereich der Eigenfrequenz kommt es zu großen Abweichungen. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Eigenfrequenz der Platte die Beschleunigungsmessung und somit auch das Berechnungsergebnis negativ beeinflusst. Außerhalb des Einflussbereichs der Eigenfrequenz stimmen die Ergebnisse sehr gut überein.

Zusammenfassung

Die Schallentstehung der Zylinder/Platte-Konfiguration kann auf Grundlage der auf die Platte wirkenden Kräfte berechnet werden. Die zwischen Platte und Fluid wirkenden Druck- bzw. Kraftschwankungen stellen somit den wesentlichen physikalischen Mechanismus, für die Verstärkung der Schalldruckpegel durch das Einfügen der Platte in den Nachlauf des Zylinders dar. Die geometrischen Voraussetzungen für das Auftreten der Verstärkung sind Gegenstand weiterer Untersuchungen.

Literatur

- [1] Deavenport, W.J.; Staubs, J.K.; Glegg, S.A.: Sound radiation from real airfoils in turbulence. *Journal of Sound and Vibration* 329 (2010), 3470–3483
- [2] Curle, N.: The influence of solid boundaries on aerodynamic sound. *Proc. Roy. Soc. London, Vol. A231* (1955), 505-514