

Modellbildung der Schalldruckverstärkung an einer Zylinder-Platte-Konfiguration

Robert Heinze¹, Till Biedermann¹, Frank Kameier¹, Oliver Paschereit²

¹Fachhochschule Düsseldorf, Fachbereich Maschinenbau und Verfahrenstechnik, Fachgebiet Strömungstechnik und Akustik, Josef-Gockeln-Str. 9, 40474 Düsseldorf, Deutschland, Email: robert.heinze@fh-duesseldorf.de

²TU Berlin, 10623 Berlin, E-Mail: oliver.paschereit@tu-berlin.de

Zusammenfassung

Wird ein Zylinder einer Strömung ausgesetzt, bildet sich in dessen Nachlauf eine periodische Wirbelschlepe aus, die auch als Kármánsche Wirbelstraße bekannt ist. Die am Zylinder wirkenden Oberflächenkräfte führen zu Druckschwankungen die sich mit Schallgeschwindigkeit in Form eines Dipols ausbreiten und akustisch als Pfeifton oder eng. *Aeolian tone* wahrgenommen werden können. Wird nun ein Interferenzkörper wie z. B. eine Platte in den Zylinder-nachlauf eingebracht, kann die Schallabstrahlung signifikant verstärkt werden. Umfangreiche Messungen an einem leisen Freistrahler an der Fachhochschule Düsseldorf zeigen, dass abhängig von jeweiligem Plattenabstand ein Muster in der Schalldruckverstärkung zu erkennen ist, welches sich auf die aerodynamische Wellenlänge der Zylinderablösung zurückführen lässt. Immer dann, wenn genau ein, zwei oder auch drei Wirbelablösepaare zwischen Zylinder und Platte passen, ist ein deutlicher Anstieg des Gesamtpegels messbar. Experimentell kann der nötige Abstand als Quotient zwischen Wirbelbewegungsgeschwindigkeit und Wirbelablösefrequenz definiert werden. Aufgrund der vorherrschenden Interferenzeffekte gestaltet sich eine präzise Prognose dieses Abstands allerdings als schwierig, da eine Variation des Plattenabstands ein nichtlineares Verhalten der benötigten Parameter nach sich zieht.

Einleitung

Eine Kármánsche Wirbelstraße entsteht, wenn ein Zylinder einer gleichförmigen Anströmung ausgesetzt ist (vgl. Abbildung 1). Die Frequenz der von der Oberfläche ablösenden Wirbel kann bis zu einer Reynoldszahl von 5.000 als Pfeifton wahrgenommen [1] werden und errechnet sich über die Strouhal-Beziehung. Eine Platte im Nachlauf des Zylinders kann die Schallemission deutlich verstärken [2], da die abgelösten Wirbel zu periodischen Oberflächenkräften an der Plattenvorderkante führen, die deutlich stärker sind als die Oberflächenkräfte am Zylinder. Wie beim Zylinder entsteht an der Plattenvorderkante ein akustischer Dipol. Dabei ist zu beachten, dass es bei definierten Plattenabständen zu einer maximalen Verstärkung des Schalldruckpegels kommt, die im Rahmen dieser Arbeit näher untersucht werden sollen.

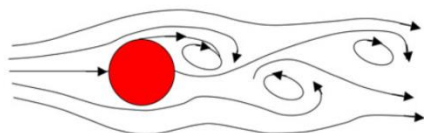


Abbildung 1: Kármánsche Wirbelstraße im Nachlauf eines Zylinders.

Versuchsergebnisse

In Abbildung 2 sind die Versuchsergebnisse einer Langzeitmessung dargestellt. Dabei wurde der Abstand zwischen Zylinder und Platte kontinuierlich erhöht, wobei die Anströmungsgeschwindigkeit konstant gehalten wurde. Das dargestellte Spektrogramm zeigt die Messdaten eines Mikrofons welches in 100 mm Entfernung unterhalb des Zylinders positioniert wurde. Es sind drei Peaks erkennbar, bei denen es zu einer deutlichen Verstärkung des Schalldruckes kommt.

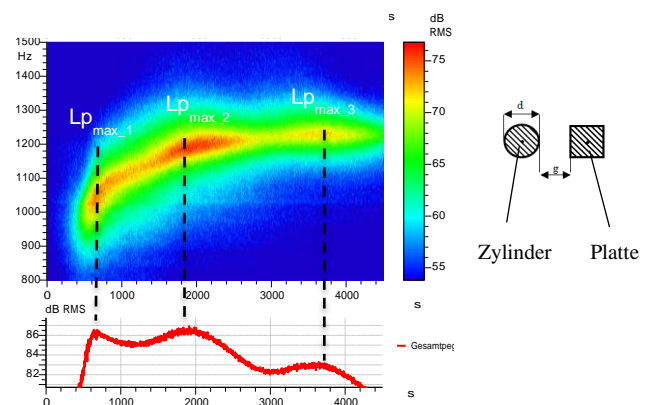


Abbildung 2: Untersuchung der Schalldruckverstärkung bei Erhöhung des Plattenabstandes: $c_w = 20,4$ m/s, $d_{Zyl} = 3$ mm, $d_{Platte} = 2,25$ mm, $Tu = 5,1$ %, Schrittweite der Platte = $0,1$ mm, Pausierzeit pro Schritt = 15 s, $(g/d)_{max} = 12$ [4].

Es kann die Hypothese formuliert werden, dass genau eine Wirbelwellenlänge oder ein Vielfaches dieser zwischen Zylinder und Platte passen muss, damit der Schalldruckpegel maximal wird. Ist diese Bedingung erfüllt, dann liegt zwischen der Zylinderablösung und dem Auftreffen der Wirbel an der Plattenvorderkante Phasengleichheit vor.

$$\left(\frac{g}{d}\right) Lp_{max,n} = \frac{\lambda_{Wirbel} \cdot n}{d_{Zyl}} = \frac{c_{Wirbel} \cdot n}{f_{Wirbel} \cdot d_{Zyl}} \quad \text{mit } n = 1..3 \quad (1)$$

Hier entspricht c_{Wirbel} der Konvektionsgeschwindigkeit der Wirbel und f_{Wirbel} der Wirbelablösefrequenz.

Zur Überprüfung dieser Formel wurden in einem ersten Schritt zwei Hitzdrähte miteinander korreliert, die in der Strömung zwischen Zylinder in Platte angebracht wurden. Aus den Ergebnissen konnte die Wirbelkonvektionsgeschwindigkeit bei $\left(\frac{g}{d}\right) Lp_{max,3}$ bestimmt werden. Des Weiteren dienten diese Messungen der Validierung numerischer Simulationen, mit deren Hilfe die Wirbelkonvektionsgeschwindigkeit auch bei kleineren Zylinder-Platte-Abständen untersucht werden kann (vgl. Abbildung 3).

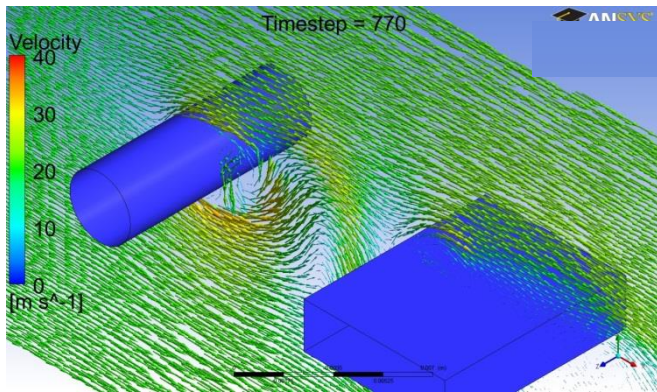


Abbildung 3: Numerische Simulation einer Zylinder-Platte-Konfiguration unter Ansys CFX: SST-Modell, $c_w=20,4$ m/s, $d_{Zyl}=3$ mm, $d_{Platte}=2,25$ mm, $Tu=5,1$ %, exemplarisch für $g/d(Lp_{max_1})=2,87$.

Die Auswertung der x-Komponente der Geschwindigkeit in der numerischen Simulation (vgl. Abbildung 4) führt indirekt zur gesuchten Wirbelkonvektionsgeschwindigkeit, da sich die Ablösewirbel aufgrund fehlender Massenträgheit auch mit dieser Geschwindigkeit bewegen werden. Gemittelt wurde über fünf Ablöseperioden entlang einer Linie zwischen Zylinder und Platte.

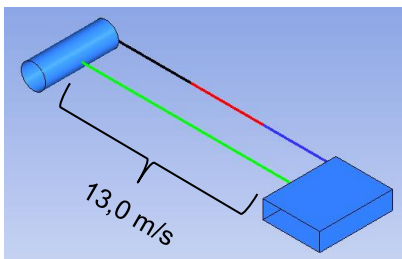


Abbildung 4: Auswertung der x-Komponente der Geschwindigkeit unter Ansys CFX: SST Modell $c_w=20,4$ m/s, $d_{Zyl}=3$ mm, $d_{Platte}=2,25$ mm, $Tu=5,1$ %, Exemplarisch für $g/d(Lp_{max_3})=8,93$.

Die beim jeweiligen Schalldruckpegelmaximum gemessenen Ablösefrequenzen aus Abbildung 2 sowie die Wirbelkonvektionsgeschwindigkeit aus der numerischen Simulation wurden in Gleichung (1) eingesetzt. Die Berechnungen zeigten, dass die Ursprungshypothese für die Vorhersage von $(g/d)_{Lp_{max_n}}$ noch um den Faktor $d_{Zyl}/2$ korrigiert werden muss. Begründet werden kann dies mit dem Ablösepunkt des Wirbels am Zylinder, der in einer groben Näherung bei ca. 90° liegt (vgl. Abbildung 5).

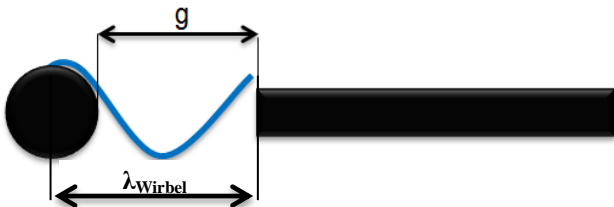


Abbildung 5: Ablösepunkt des Wirbels am Zylinder.

Das Einsetzen des Korrekturfaktors ergibt

$$\frac{g}{d}(Lp_{max_n}) = \frac{c_{Wirbel} \cdot n \cdot \left(\frac{d_{Zyl}}{2}\right)}{f_{Wirbel} \cdot d_{Zyl}} \quad n=1..3 \quad (2)$$

Tabelle 1 zeigt die Ergebnisse der Modellvalidierung mittels Formel 2. Es wird deutlich, dass der berechnete Abstand für das zweite und dritte Schalldruckpegelmaximum qualitativ gute Ergebnisse liefert. Der berechnete Abstand für das erste Schalldruckpegelmaximum liegt allerdings deutlich unter dem experimentell bestimmten Abstand. Begründet werden kann dies mit den starken Interferenzeffekten bei geringem Plattenabständen und den daraus resultierenden Nichtlinearitäten. Der Ablösewirbel erfährt starke Umlenkungen, wodurch die x-Komponente der Geschwindigkeit als Näherung für die Wirbelkonvektionsgeschwindigkeit unzureichend ist. Zudem wird der Ablösewirbel stark verzerrt. Eine genaue Untersuchung speziell dieses Bereichs, kann der Arbeit von Biedermann et. al [4] entnommen werden.

Tabelle 1: Modellvalidierung der Abstände bei maximalem Schalldruckpegel.

	Lp_{max1}	Lp_{max2}	Lp_{max3}
g/d gemessen	2,87	5,80	8,93
Simulation: c_{Wirbel} in m/s	7,3	11,6	13,1
g/d berechnet	1,83	5,94	9,98
Abweichung in %	36%	-2%	-12%

Zusammenfassung

- Bei einer Zylinder/Platte-Konfiguration liegen in definierten Plattenabständen Maxima in den Schalldruckpegeln vor → Die Zylinderablösung und das Auftreffen der Wirbel an der Plattenvorderkante sind phasengleich.
- Es konnte ein Modell zur Beschreibung des Abstands bei maximaler Schallemission optimiert werden. Der Ablösewirbel fußt näherungsweise am Zylinderpol (90°).
- Das Modell zur Abstandbestimmung funktioniert in erster Näherung für $(g/d)_{Lp_{max_{2,3}}}$.
- Geringe Plattenabstände führen zu extremen Interferenzeffekten zwischen Zylinder und Platte, wodurch das Modell für $(g/d)_{Lp_{max_1}}$ sehr ungenau wird.

Literatur

- [1] Hucho, W.: Aerodynamik des Automobils. VDI Verlag, dritte Auflage, 78-79, 1994.
- [2] Winkler, M.: Experimentelle Untersuchung aeroakustischer und strukturendynamischer Effekte an einer Zylinder/Platte-Konfiguration. Dissertation, TU Berlin, 2012.
- [3] Sumer, B. M. J., Fredsoe, J.: Advanced Series on Ocean Engineering - Hydrodynamics around Cylindrical Structures, World Scientific Publ. Co., Singapore, 2006
- [4] Biedermann, T., Heinze, R. Kameier, F. Paschereit, O.: Experimentelle Untersuchung der Schalldruckverstärkung an einer Zylinder/Platte-Konfiguration mit Hilfe statistischer Methoden, Daga Oldenburg, 2014.