Resonante Schallentstehung bei Geländern und Zäunen

Roman Tschakert, Drasko Masovic, Ennes Sarradj

TU Berlin, Fachgebiet Technische Akustik, 10587 Berlin, Deutschland, Email: roman.tschakert@tu-berlin.de

Einleitung

Von einem Fluid umströmte Körper führen häufig zu periodischen Wirbelablösungen und einer Schallentstehung, dem sogenannten Hiebton, dessen Frequenz von der Strömungsgeschwindigkeit und der Form des Körpers abhängt. Werden regelmäßig angeordnete Plattenkaskaden durchströmt, können die Wirbelablösungen mit Luftschall Resonanzen, den sogenannten Parker-Resonanzen [1], koppeln, deren Frequenz von der Geometrie der Struktur und der angeregten Ordnung abhängen. Bei bestimmten Geschwindigkeitsbereichen kann dadurch eine tonale Schallabstrahlung mit hohen Pegeln entstehen.

Geländer oder Zäune aus Flachstangen stellen häufig eine solche regelmäßige Plattenkaskade dar. Abhängig vom Aufstellort und den Witterungsbedingungen können neben dem üblichen Heulen des Windes die kreischenden, monofrequenten Schallereignisse entstehen (Abbildung 1).

Abbildung 1: Verschiedene Zäune bei denen die monofrequenten, resonanten Schallereignisse beobachtet wurden. Das Foto unten rechts zeigt die Einfahrt des Messegeländes Wien hinter der Messehalle A und wurde während der Tagung aufgenommen.

Ein weiteres Beispiel ist ein Lokomotivkühler bei dem tonale Schallentstehung auf Parker-Resonanzen zurückgeführt werden konnte [2]. Im Gegensatz zu den Beobachtungen der Autoren an Zäunen, traten dort auch höhere Ordnungen der Resonanz auf.

Im Folgenden werden die Grundlagen der Schallentstehung erläutert und Messungen an einem Geländer im Windkanal vorgestellt. Es werden allgemeine Empfehlungen gegeben, wie die resonante Schallentstehung verhindern werden kann. Verschiedene Maßnahmen wurden umgesetzt und im Windkanal am Geländer und an einem Holzmodell geprüft. Das Ziel war, die resonante Schallentstehung wirkungsvoll zu verhindern, ohne dass sich das Erscheinungsbild signifikant ändert.

Parker-Resonanzen

Das Phänomen einer strömungsakustischen Resonanz an parallelen Platten wurde von R. Parker experimentell und theoretisch untersucht [1], [3]. Hierbei koppeln die Wirbelablösungen an den Stäben mit den durch die periodische Struktur der parallelen Platten entstehenden Resonanzen der Zwischenräume. In [4] ist dies durch numerische Simulationen anschaulich dargestellt.

Während das Frequenzmaximum eines Hiebtons proportional mit der Strömungsgeschwindigkeit steigt

$$f_{Hieb} = St\frac{u}{d} \tag{1}$$

mit	f_{Hieb}	Frequenz des Hiebtons,
	St	Strouhalzahl,
	u	Strömungsgeschwindigkeit,
	d	Dicke des umströmten Körpers,

ist die Frequenz der Parker-Resonanz von der Strömungsgeschwindigkeit unabhängig. In [4] wurde aus Experimenten an 5 parallelen Platten folgende empirische Formel für die Resonanzfrequenz der von Parker als β bezeichneten Mode entwickelt

$$f_{res} = 0,5\frac{c}{l} \Big/ \left(1 + 0,7\left(\frac{s}{l}\right)^{0,84}\right) \tag{2}$$

mit	c	Schallgeschwindigkeit,
	l	Länge der einzelnen Platten in Strömungsrichtung,
	s	Abstand der Platten.

Mit c=344 m/s, l=0,070 m und s=0,095m ergibt sich für das im Windkanal untersuchte Geländerelement rechnerisch eine Resonanzfrequenz von 1290 Hz. Gemessen wurde eine Resonanzfrequenz von 1279 Hz.

In Abbildung 2 ist zu erkennen wie sich die Bereiche hoher Schalldruckpegel zwischen den Platten bei der von Parker als β bezeichneten Mode verteilen. Die Fächer schwingen jeweils um 180 Grad phasenversetzt. Es entstehen entlang des Geländers aneinandergereihte Dipole. Dies führt zu einer höheren Schallabstrahlung entlang des Geländers als senkrecht dazu. Aufgrund der ungeraden Anzahl an Platten sind gleich viele Felder mit positiver und negativer Phase vorhanden.

Messungen im Windkanal

In Abbildung 3 ist der Messaufbau dokumentiert. Das Geländerelement wurde senkrecht zur Strömungsrichtung direkt an der Düse des Windkanals befestigt, um eine senkrechte, möglichst laminare

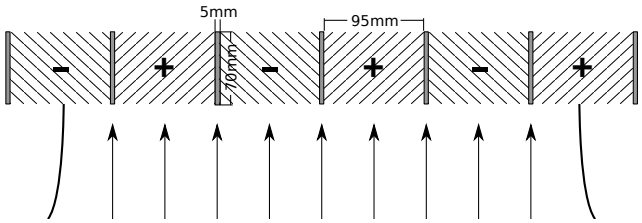


Abbildung 2: Senkrechte Anströmung der Geländerstreben an der Düse des Windkanals. Im Resonanzfall schwingen nebeneinander liegende Fächer gegenphasig (im Bild durch die Schraffur markiert).

Anströmung zu gewährleisten. Fünf Streben bzw. vier vollständige Zwischenräume befinden sich in der Strömung. Vier der angeströmten Streben haben eine Dicke d von 5,0 mm, die ganz rechte Strebe ist 6,2 mm dick.

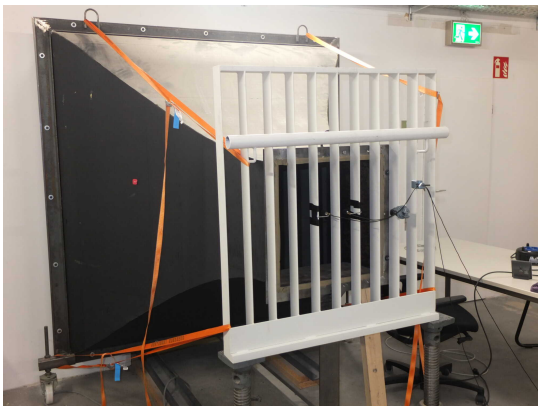


Abbildung 3: Messaufbau. Der Abstand zwischen den Streben betrug im Mittel 95 mm (±1 mm).

In Abbildung 4 sind die Ergebnisse für einen typischen Messlauf abgebildet (Hochfahren des Windkanals und konstante, maximale Strömungsgeschwindigkeit von etwa 32 m/s ab 75 s). Die dazugehörigen Spektren während des Hochfahrens und in der Resonanz sind in Abbildung 5 dokumentiert. Die tonale Resonanz tritt deutlich aus dem Spektrum hervor im Vergleich zum schmalbandigen Hiebton während des Hochfahrens.

Maßnahmen theoretisch

Die Frequenz der Parker-Resonanz ist abhängig von

1. der Länge der Streben in Umströmrichtung,
2. dem konstanten Abstand zwischen den Streben und
3. der Ordnung der angeregten Mode.

Mit steigender Strömungsgeschwindigkeit wächst die Frequenz des Hiebtons proportional. Befindet sich die nur von der Geometrie des Geländers abhängige Parker-Resonanz im Spektrum des Hiebtons, koppeln die Wirbelablösungen mit der Resonanz (Abbildungen 4 und 5).

Um dies zu verhindern, kann z. B. die Geometrie des Geländers so verändert werden, dass die Hiebtöne erst bei **unrealistisch hohen Strömungsgeschwindigkeiten**

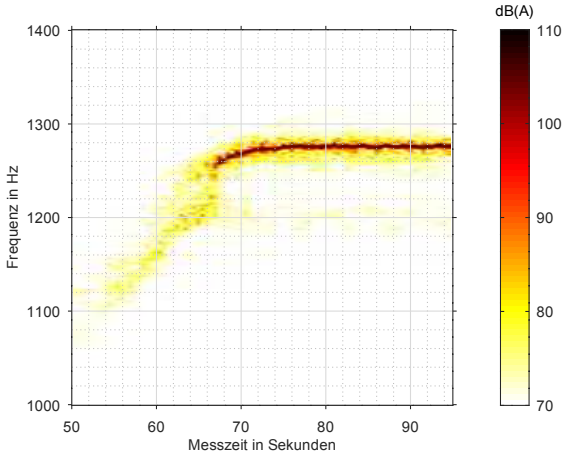


Abbildung 4: Spektrogramm. Hochfahren des Windkanals und Resonanzfall ab 75 s.

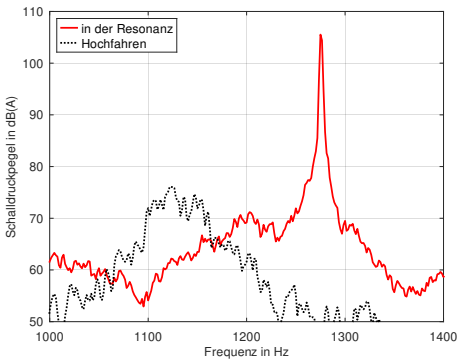


Abbildung 5: Frequenzspektren während des Hochfahrens (im Spektrogramm bei 55 s) und in der Resonanz.

mit der Parker-Resonanz zusammentreffen. Dies kann erreicht werden durch

a) Dickere Streben. Die Frequenz des Hiebtons ist indirekt proportional zur Dicke d. Z. B. bei doppelter Dicke halbiert sich die Frequenz, d. h. es wäre die doppelte Strömungsgeschwindigkeit erforderlich, um die gleiche Hiebtonfrequenz zu erzeugen.

b) Verringern der Abstände s zwischen den Streben. Dies ist weniger effektiv, da die Frequenz der Parker-Resonanz bei z. B. halbem Abstand von rechnerisch 1290 Hz nur auf 1630 Hz (Faktor 1,25) steigt.

c) Verringern der Tiefe der Streben in Strömungsrichtung l. Auch dies ist weniger effektiv, da z. B. bei halber Tiefe die Frequenz der Parker-Resonanz auf 1875 Hz (Faktor 1,45) steigt.

Wenn der Abstand zwischen den Streben nicht verändert werden soll, empfiehlt es sich, die Dicke der Streben zu erhöhen und gleichermaßen die Tiefe in Strömungsrichtung zu verringern. Dadurch erhöht sich das Gewicht des Geländers nicht und bei einem Skalierungsfaktor von z. B. 2 bzw. $\frac{1}{2}$ wäre die knapp dreifache Windgeschwindigkeit erforderlich, um die Parker Resonanz anzuregen. Weiterhin ist es möglich

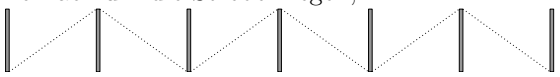
A) die **Strömung turbulent** zu machen, um das Auftreten des Hiebtons zu verhindern, oder

B) durch geeignete Variationen im regelmäßigen Design des Geländers, die Entstehung der **Resonanz** zu **verhindern**.

Maßnahmen für die Praxis

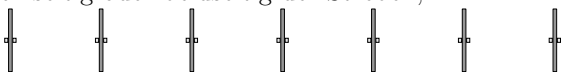
Ausgehend von den theoretischen Betrachtungen werden folgende Maßnahmen für die Planung neuer Geländer oder die Modifikation bestehender Geländer vorgeschlagen (Schnittzeichnungen Ansicht von oben, Foto Ansicht schräg auf Hinterkante):

A1) Gerüstschutznetz entlang der Hinterkante oder im Zickzack um die Streben legen,



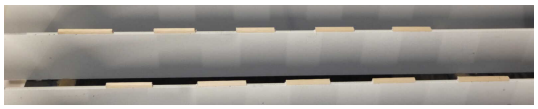
A2) Turbulatoren auf den Streben über die gesamte Höhe des Geländers anbringen, z.B. Leisten (3,5 × 5 mm)

einseitig oder beidseitig der Streben,



B1) Tiefe der Streben variieren (jeweils im Wechsel 2 lang und 2 kurz),

B2) Hinterkante abwechselnd unregelmäßig gestalten (mit aufgeklebten 5 cm langen Leisten simuliert),

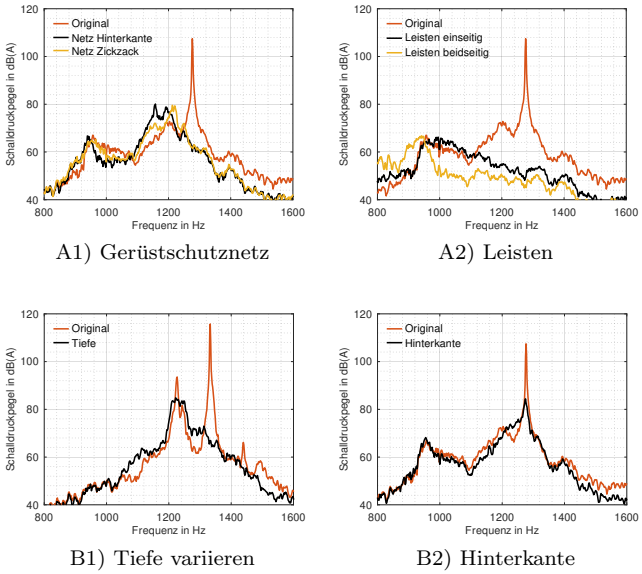


B3) Druckausgleich zwischen den Fächern ermöglichen durch ausreichend große Löcher oder Schlitze in den Streben,

B4) Aperiodische Anordnung der Streben bzw. unregelmäßige Abstände zwischen den Streben.

Die Maßnahmen A1), A2) und B2) wurden an dem Geländerelement im Windkanal getestet, die Maßnahme B1) an einem Holzmodell. Die dazugehörigen Frequenzspektren sind in Abbildung 6 dokumentiert. Für die Maßnahmen B3) und B4) stehen die Versuche im Windkanal noch aus.

Die Maßnahmen sind allesamt geeignet, das Entstehen der Parker-Resonanz wirkungsvoll zu verhindern. Bei der Auswahl einer Maßnahme werden weitere Aspekte, wie Design, Gewicht und Statik, eine Rolle spielen. Inwieweit die festgestellten Pegelunterschiede zwischen den Varianten in die Entscheidungsfindung eingehen sollten, ist im Einzelfall zu prüfen, da i. d. R. mit hohen allgemeinen Windgeräuschen zu rechnen ist.



A1) Gerüstschutznetz A2) Leisten

B1) Tiefe variieren B2) Hinterkante

Abbildung 6: Frequenzspektren der im Windkanal getesteten Maßnahmen.

Fazit

Es wurde gezeigt, dass bei Zäunen oder Geländern aus parallelen Streben üblicher Bauart, bei starkem Wind Parker-Resonanzen angeregt werden können, die zu einer tonalen Schallabstrahlung mit hohem Pegel führen. Belästigungen der Anwohnerinnen und Anwohner sind zu erwarten. Überall wo starke Windböen auftreten können, z. B. bei frei stehenden Zäunen oder Geländern an Aussichtsplattformen etc. sollte der Effekt bei der Planung berücksichtigt werden.

Dabei lässt sich schon durch kleine Modifikationen am Design der Geländer das Problem wirkungsvoll vermeiden, ohne dass das Erscheinungsbild grundlegend verändert wird. Aber auch bei bestehenden Geländern kann durch das nachträgliche Anbringen von Turbulatoren das Problem wirkungsvoll beseitigt werden, ohne die gesamte Konstruktion austauschen zu müssen.

Literatur

[1] Parker, R.: Resonance effects in wake shedding from parallel plates: Some experimental observations. Journal of Sound and Vibration 4 (1966), Nr. 1, 62-72.

[2] von Heesen, W.; Heim, S.; Kirschinger, C.; Mauch, U.; Zwicker, D.: Parker-Resonanzen als Ursache für tonale Störgeräusche an einem Lokomotivkühler. DAGA '05 - München.

[3] Parker, R.: Resonance effects in wake shedding from parallel plates: Calculation of resonant frequencies. Journal of Sound and Vibration 5 (1967), Nr. 2, 330-343.

[4] Yokoyama, H.; Kitamiya, K.; Iida, A.: Flows around a cascade of flat plates with acoustic resonance. Physics of Fluids 25 (2013), Oct, Nr. 10, 106104-1-22.