

Strömungsgeräusche an Fassaden

Wolfgang Hergert
Peter Brandstät

*Univ.-Prof. (em.) Dr.-Ing. habil. Dr. h.c. mult. Dr. E.h. mult. Karl Gertis
zum 80. Geburtstag gewidmet*



Strömungsgeräusche an Fassaden

Akustische Untersuchungen an Fassadenelementen in einem Windkanal können wichtige Erkenntnisse zu potentiellen Strömungsgeräuschen bei deren Überströmung liefern. Die Quellen für Strömungsgeräusche sind vielfältig und werden oft durch Löcher, Öffnungen, Kanten sowie vibrierende Teile verursacht. Sie können unter Umständen sehr vom Anströmwinkel und einer bestimmten Windgeschwindigkeit abhängig sein. Messungen an verschiedenen Fassadenelementen im Windkanal am Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP zeigten auch, dass nicht zwangsläufig nur hohe Windgeschwindigkeiten zu Problemen führen. Gerade niedrigere Strömungsgeschwindigkeiten, die zu bestimmten geometrischen Abmessungen passen, können ausgeprägte Lärmquellen bilden. Laut Beaufortskala entspricht eine Windstärke von 10 – 20 m/s schon einem starken bis stürmischen Wind. Bei solch hohen Windgeschwindigkeiten ist das allgemeine Hintergrundgeräusch bereits deutlich angehoben und Geräusche an Fassadenelementen können von diesem maskiert werden. Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die meist sehr große Fläche von Fassaden. Wenn bereits an einem Fassadenausschnitt im Windkanal markante Strömungsgeräusche entstehen, ist eine weit höhere Schallabstrahlung am Gebäude zu erwarten. Ziel der akustischen Untersuchungen und Optimierungen an einer windüberströmten Fassade sollte dabei immer sein, sie in Einklang mit dem Design und der Konstruktion der Fassade zu bringen.

Stichworte: Fassaden; Windgeräusche; Windkanal; tonale Geräusche; Geräuschminderung.

1 Motivation

Die Motivation zur Durchführung von Messungen an Fassadenelementen liegt darin begründet, dass an Fassaden Strömungsgeräusche entstehen und diese das Wohlbefinden in der unmittelbaren Umgebung beeinflussen können. Die zugrundeliegenden Strömungsgeräusche entstehen, wenn Wind über eine Fassade weht. In Häuserschluchten von Großstädten und beispielsweise an Hochhäusern ist aufgrund von thermischen und weiteren Witterungsbedingungen von einer stetigen Anströmung der Gebäude auszugehen. Hierbei sollten nicht nur die mittleren und hohen Geschwindigkeiten von Winden Beachtung finden, sondern gerade auch niedrige Geschwindigkeiten. Markante Geräusche an Fassaden bei niedrigeren Windgeschwindigkeiten können unter Umständen viel lästiger sein, da sie sich deutlicher vom Hintergrundpegel abheben. Inhalt dieses Artikels ist die Durchführung von Messungen an aus-

Noise sources at façades created by flow

Acoustic investigations at façade elements in a wind tunnel may come up with important findings concerning potential noise sources created by the flow. The sources of noise are manifold and are often caused by holes, openings, edges and vibrating parts. They are possibly very dependent on the angle of flow incidence and a certain flow velocity. Measurements at different façade elements in the wind tunnel of the Fraunhofer-Institute for Building Physics IBP showed also that not necessarily high flow velocities cause the problems. In contrast, low flow velocities that match to certain geometrical dimensions may cause decent sources of noise. A flow velocity of 10 – 20 m/s is already a strong or stormy wind when compared with the Beaufort scale. At such high wind velocities, the general noise level is already raised considerably and able to mask the additional noise of façade elements. A further and important aspect is the very big area of real façades. When already a distinctive flow noise occurs on a façade cutout in the wind tunnel, a much higher noise emission at the building can be expected. Finally, aim of the acoustic tests and optimizations on a wind exposed façade should always be to bring them in line with the design and construction of the façade.

Keywords: façades; wind noise, wind tunnel; tonal noise; noise reduction.

gewählten Fassadenelementen in einem Windkanal. Das Ziel der Messungen ist es, vor der Installation der Fassade an einem Gebäude mögliche Geräuschquellen zu erkennen und bei Bedarf durch geeignete Maßnahmen zu reduzieren.

2 Funktion von Fassaden

Fassaden dienen nicht nur dem Schutz vor Witterungsbedingungen, sondern sie decken im heutigen Fassadenbau ein sehr breites Spektrum an Funktionen ab. Diese sind thermische Isolation des Gebäudes (Energiebilanz), Komfort (Licht und Beschattung), Konstruktion und architektonisches Design als auch akustische Aspekte wie Schalldämmung sowie die durch Wind induzierten Strömungsgeräusche an der Fassade. Aufgrund der meist recht großen Flächen von Fassaden sind letztere nicht zu unterschätzen und zunehmend von großer Bedeutung. Da akustische Un-

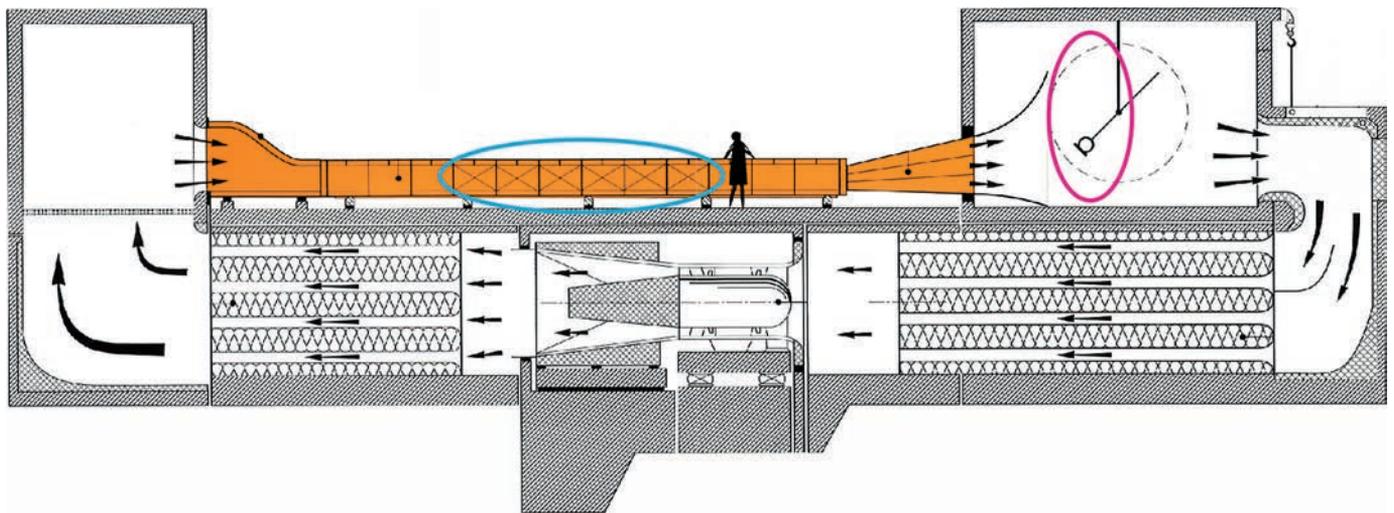


Bild 1. Windkanal am Fraunhofer IBP in Stuttgart.
Fig. 1. Wind tunnel at the Fraunhofer IBP Stuttgart.

tersuchungen in Hinblick auf die Strömungsgeräusche von Fassaden in realen Umgebungen (Stadt, Hochhaus, etc.) sehr schwer durchführbar sind, können Untersuchungen in einer Laborumgebung helfen, die tatsächlichen Windgeräusche an Fassaden zu erfassen. Hierbei geht es um eine recht große Abdeckung der möglichen realen Anströmszenarien von Luftströmungen auf einen Fassadenausschnitt.

3 Testumgebung Windkanal

Die Durchführung von akustischen Untersuchungen an Fassaden ist an eine wichtige Randbedingung geknüpft: Es sollte eine sehr leise Windströmung zur Verfügung stehen. Dies bedeutet, dass Störgeräusche ausgehend vom Windgenerator, so gut wie möglich akustisch auszublenden sind. Eine solche Ausblendung des Windgeneratorgeräuschs erfolgt baulich zum einen durch eine getrennte Lagerung des Gebläses, wodurch Körperschallübertragungen unterdrückt werden. Eine Dämpfung des Geräuschs entlang der angeschlossenen Kanalleitungen erfolgt zum anderen, beispielsweise mithilfe von Kulissenschalldämpfern, durch Reduzierung der abgestrahlten Schalleistung in die luftführenden Kanäle. Ziel dieser Maßnahmen ist ein geringes Fremdgeräusch bei laufendem Windgenerator im Messraum und in der Messumgebung. Die geforderten Randbedingungen werden zum Beispiel von aeroakustischen Windkanälen erfüllt, wie sie in der Automobilindustrie verwendet werden [1]. Um den Aufwand für derartige Untersuchungen an Fassaden in einem vertretbaren Rahmen zu halten, werden am Fraunhofer IBP modellhafte Ausschnitte von Fassadenstrukturen in einem Windkanal mit einem Kanalquerschnitt von maximal $1300\text{ mm} \times 500\text{ mm}$ durchgeführt. Hierfür kann der Schalldämpfer-Prüfstand, entwickelt für Schalldämpferuntersuchungen, mit seinen hohen akustischen Anforderungen für Schalleistungsmessungen an Fassadenausschnitten genutzt werden. Die akustischen Messungen finden in Hallräumen der Genauigkeitsklasse 1 nach [2] statt. Der Windkanal ist in Bild 1 schematisch dargestellt.

Der Windkanal verfügt über eine in der Breite variable Messtrecke. Vor und nach der Messtrecke (gelber Bereich in Bild 1) ist jeweils ein Hallraum angeschlossen. Das

Gebläse zur Erzeugung der Strömung mit einer Leistung von 130 kW liegt eine Etage unter dem eigentlichen Windkanal und ist vom restlichen Gebäude körperschallentkoppelt. Im Weiteren befinden sich vor und nach dem Axialgebläse jeweils lange Kulissenschalldämpfer. Diese Maßnahme und die Entkopplung des Trägerfundamentes führen zur geforderten leisen Luftströmung ohne überlagertes Turbinengeräusch und ist entscheidend für die akustischen Untersuchungen. In dem Windkanal kann mit einer Querschnittsfläche von $1000\text{ mm} \times 500\text{ mm}$ eine maximale Strömungsgeschwindigkeit von 70 m/s erzeugt werden.

4 Prüfanordnungen

Wenn es gelingt, anhand beispielhaft ausgewählter und entsprechend angeordneter Fassadenausschnitte, akustisch auffällige Strömungsgeräusche, die im Frequenzspektrum vor allem als tonale Komponenten hervortreten, im Prüfstand zu ermitteln, kann davon ausgegangen werden, dass diese Strömungsgeräusche auch im späteren Einsatzfall der Fassade auftreten werden. Derartige akustische Schwachstellen sind zum einen mit den Untersuchungen zu lokalisieren und darauf aufbauend sind Maßnahmen zu entwickeln, um diese Schwachstellen zu beseitigen. Die Fassadenausschnitte sollten so gewählt werden, dass sie einen repräsentativen Ausschnitt aus der Komplettkonstruktion der Fassade darstellen. Hierbei sollte, sofern möglich, der Maßstab gleich zur Originalfassade sein, um etwaige Skalierungseinflüsse zu vermeiden.

Die zu untersuchenden Fassadenausschnitte können auf verschiedene Art und Weise im Windkanal installiert werden. Entspricht der Fassadenausschnitt den Kanalabmessungen, kann er direkt in die geschlossene Messstrecke (Blau markierter Bereich in Bild 1) eingebaut werden. Die Bestimmung der Schalleistung erfolgt im angeschlossenen Hallraum nach [3].

Für Untersuchungen an größeren Ausschnitten von Fassaden ist es möglich, diese in dem angeschlossenen Hallraum direkt hinter der Auslassdüse zu platzieren (Magenta markierter Bereich in Bild 1). Die Schalleistung wird im Hallraum nach [2] bestimmt. Als Referenz zu den

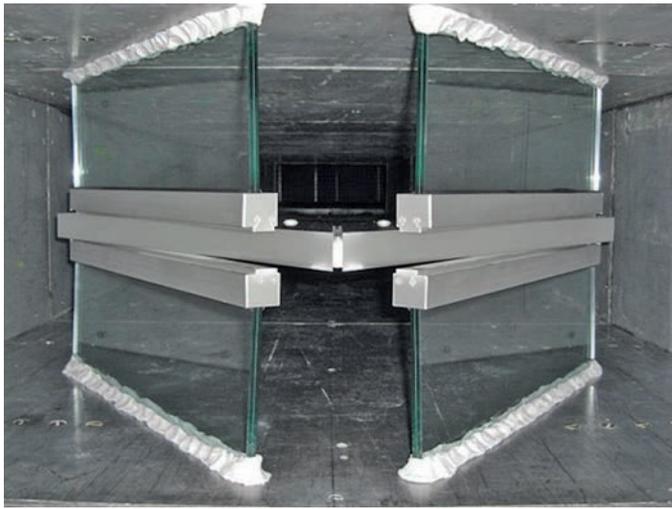


Bild 2. Ausschnitt eines in den Windkanal eingebauten Fassadenelements.

Fig. 2. Detail of an installed façade element in the duct of the wind tunnel.

Messungen mit Testobjekt dient jeweils der Windkanal ohne installierte Fassade. Dies bedeutet, es wird das Geräusch bestimmt, welches ausschließlich infolge der Strömung durch den Windkanal entsteht. Dieses „Grundgeräusch“ der Strömung wird bei jeder Messung miterfasst und stellt die untere Messgrenze dar.

5 Fassadenelemente im Windkanal

In vielen Fällen ist es ausreichend nur einen Fassadenausschnitt, wie exemplarisch in Bild 2 dargestellt, in den begrenzten Querschnitt des Windkanals direkt einzubauen. Dabei wird vorab eine Auswahl getroffen, welcher Teil der zu untersuchenden Fassade repräsentativ und womöglich am auffälligsten für die Untersuchung von Strömungsgeräuschen ist. Die Kontaktflächen zwischen dem Testobjekt und den Begrenzungsflächen des Windkanals werden abgedichtet.

Bild 3 zeigt Messungen des nach Bild 2 eingebauten Elements bei einer Anströmgeschwindigkeit von 8 m/s und 10 m/s. Es sind deutliche tonale Komponenten im Frequenzspektrum bei 200 Hz und 400 Hz zu erkennen. Mit einer Abdeckung des offenen Eckbereichs (Bildmitte) können die tonalen Anteile signifikant reduziert werden. In diesem Fall konnte die Form und Geometrie dieses Bereichs als Ursache für die tonalen Strömungsgeräusche identifiziert werden. Darauf aufbauend ergaben sich Hinweise für die Optimierung der Fassade, die in Zusammenarbeit mit den Architekten und Fassadenbauern in eine strömungsakustisch günstigere Ausführung überführt werden konnten.

Die ermittelten Pegelerhöhungen beispielsweise im Bereich von 400 Hz weisen eine markante Tonhaltigkeit des Strömungsgeräusches auf. Dieses Windgeräusch, vergleichbar mit einem stetigen Pfeifen, kann für die Menschen im betreffenden Gebäude (Büro, Wohnung) bereits eine störende Wirkung haben. Aber auch benachbarte Gebäude oder öffentliche Plätze können durch die abgestrahlte Gesamtschalleistung beeinflusst beziehungsweise gestört werden. Aufgrund der Tonhaltigkeit kann dieses

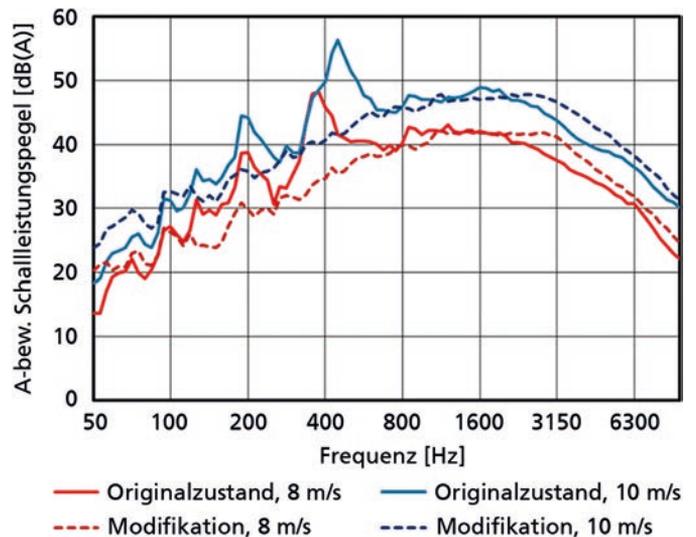


Bild 3. Ermittelte Schalleistung des Fassadenausschnittes (Einbau nach Bild 2) bei verschiedenen Anströmgeschwindigkeiten und Modifikationen.

Fig. 3. Determined sound power level of the façade element (installed according to Fig. 2) at different flow velocities and modifications of the design.

Geräusch als störender wahrgenommen werden als ebenfalls vorhandene Verkehrsgeräusche, welche eher ein breitbandiges Geräuschspektrum aufweisen.

Die hier dargestellten Windgeschwindigkeiten von 8 bis 10 m/s entsprechen nach der Beaufortskala einer frischen Brise und können in Innenstädten mit vielen Hochhäusern recht häufig auftreten. Die Windgeschwindigkeiten in Großstädten mit einer ausgeprägten Hochhauslandschaft können weitaus höher sein als in der näheren Stadtumgebung. Dieses Phänomen ist seit vielen Jahrzehnten bekannt und findet in der Auslegung von Windlasten an Hochhäusern Berücksichtigung. Dahingehend spielt die akustische Betrachtung von Windgeräuschen an Fassaden aktuell eher noch eine untergeordnete Rolle. Doch auch hier erlangt die Akustik im Zusammenhang mit windinduzierten Geräuschen an urbanen Oberflächen stetig eine immer größere Bedeutung.

6 Fassadenelemente im Hallraum

Zur Bestimmung der Windgeräusche an größeren Fassadenaufbauten ist es möglich, diese gemäß Bild 4 nach der Auslassdüse des Windkanals im angeschlossenen Hallraum zu platzieren. Aufgrund der Flächenverhältnisse sind nach der Auslassdüse noch Strömungsgeschwindigkeiten von bis zu 20 m/s erreichbar. Die aufgebauten Fassadenelemente können unter beliebigen Anströmwindeln untersucht werden. Zeitgleich zu den akustischen Messungen können ebenfalls eventuell vorhandene Strukturschwingungen betrachtet werden. Dies erweitert die Analysefähigkeit der Quellzuordnung vor allem bei komplexeren Fassaden, bestehend aus den unterschiedlichsten Materialien und Bauteilen.

Das in Bild 4 abgelichtete Design-Fassadenelement ist eine vorgebaute „bewegliche Wand“, welche aus vielen kleinen und unabhängig voneinander beweglichen Platten besteht, die Strömungen durch den Wind wellenförmig

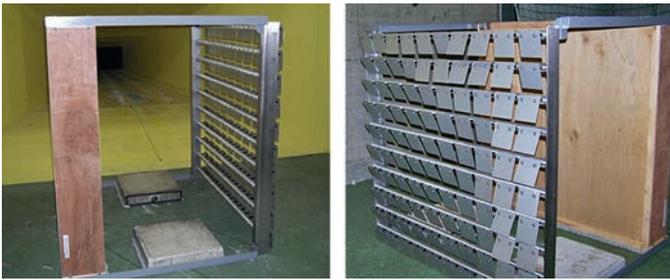


Bild 4. Design-Fassadenelement aufgestellt im Hallraum nach der Auslassdüse.
 Fig. 4. Design façade element placed in the reverberation room after the outlet nozzle.

sichtbar machen sollen. In einer ersten Versuchsreihe war es das Ziel, die Schalleistung am Originaldesign zu erfassen. Hierfür wurden Messungen mit Anströmgeschwindigkeiten von 1 m/s bis 15 m/s unter verschiedenen Anström winkeln durchgeführt. Die Anströmgeschwindigkeit wurde vor dem Testobjekt durch Mittelung über die gesamte Fläche bestimmt. Beispielhaft für diesen Messzyklus ist in Bild 5 die A-bewertete Schalleistung unter einem Anströmwinkel von 90° (Windrichtung senkrecht) auf das Fassadenelement im Vergleich zur Messung des leeren Windkanals (Referenz) wiedergegeben.

Die Messungen zeigen, dass ein breitbandiges Strömungsgeräusch durch die Design-Fassade entsteht. Im Weiteren ist zu erkennen, dass mit zunehmender Anströmgeschwindigkeit das Strömungsgeräusch mit Fassadenelement sich immer weiter dem Strömungsgeräusch ohne Fassadenelement nähert. Die Begründung liegt darin, dass bei höheren Windgeschwindigkeiten die beweglichen Platten nach „hinten“ gedrückt werden und keine Bewegung mehr ausführen. Somit geht das typische Geräusch durch die Eigenbewegung der Platten verloren. Eine Schlussfolgerung für dieses Testobjekt war demnach, dass nicht die hohen Windgeschwindigkeiten maßgeblich für störende

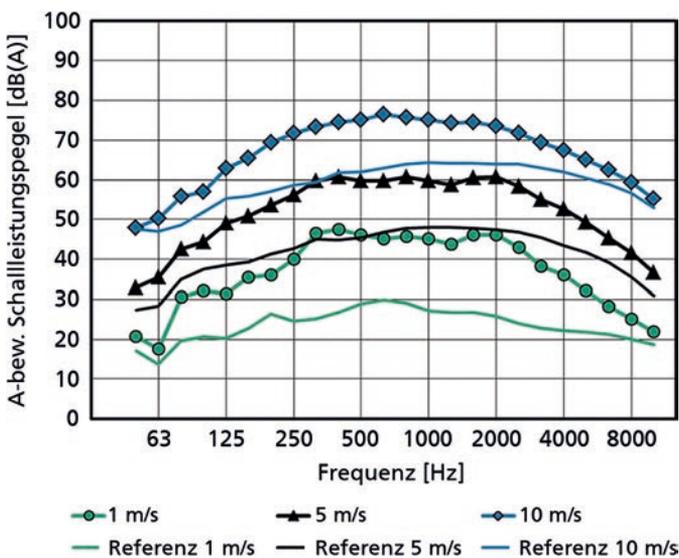


Bild 5. A-bewertete Schalleistung des Design-Elementes bei unterschiedlichen Windgeschwindigkeiten.
 Fig. 5. A-weighted Sound Power Level of the design façade element at different flow velocities.

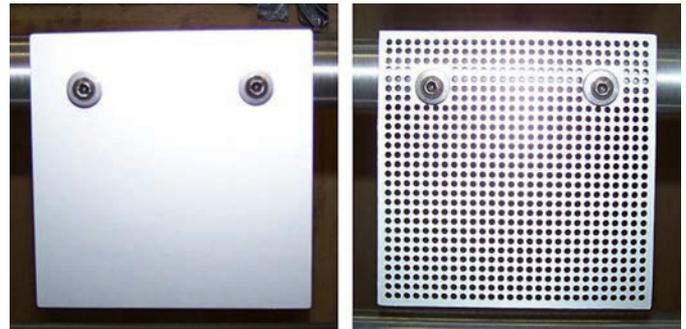


Bild 6. Beispiele für unterschiedlich gestaltete Fassadenplatten. Links: Original (Plattenkonfig. 1), rechts: gelochte Ausführung (Plattenkonfig. 4).
 Fig. 6. Examples of differently designed façade panels. Left: original (panel type 1), right: perforated version (panel type 4).

Geräusche waren, sondern Geschwindigkeiten unter 5 m/s. Resultierend aus diesen Erkenntnissen musste eine Geräuschoptimierung an den Platten und ihrer Befestigung durchgeführt werden, um eine Geräuschbelastung durch diesen Fassadentyp zu verhindern. Bild 6 zeigt zwei Beispiele unterschiedlich ausgeführter Platten, die zusätzlich durch verschiedene Arten und unterschiedlich angebrachte Unterlagscheiben elastisch gelagert angebracht wurden.

Einige der Ergebnisse aus dieser zweiten Messreihe mit vier verschiedenen Ausführungen sind für eine Anströmgeschwindigkeit von 5 m/s in Bild 7 wiedergegeben.

Die dargestellten Messungen wurden bei einem Anströmwinkel von 90° bestimmt. Es ist eine deutliche Reduzierung der Schalleistung mit der Plattenkonfiguration 4 gegenüber der Ausgangskonfiguration 1 zu erkennen. Das Strömungsgeräusch der Variante 4 liegt sehr nah am reinen Strömungsgeräusch ohne Fassadenelement. Mit diesem Ergebnis und der erarbeiteten optimierten Plattenkonfiguration ist keine zusätzliche Geräuschquelle durch das

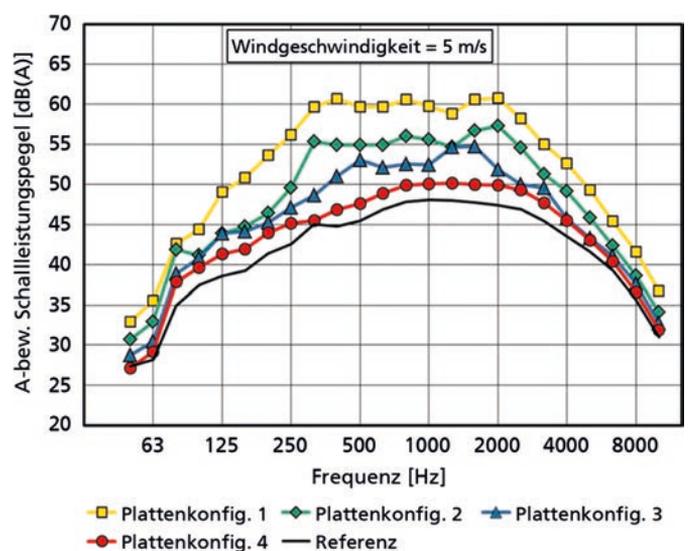


Bild 7. A-bewertete Schalleistung des Design-Elementes mit unterschiedlichen Plattenkonfigurationen.
 Fig. 7. A-weighted Sound Power Level of the design element with different panel configurations.



Bild 8. Lamellenvorsatz für eine Fassade, eingebaut im Anschluss an den Expansionstrichter.
Fig. 8. Arrangement of fins for a façade, installed after the nozzle.

Fassadenelement am Einbauort zu erwarten. Im Weiteren konnte durch diese akustisch optimierte Variante auch das zugrundeliegende Designkonzept des Fassadenelementes bewahrt bleiben.

Ein ebenfalls zu beachtender Aspekt ist der Zusammenhang von Materialschwingungen aufgrund einer windüberströmten Fassadestruktur und deren Einfluss auf eine mögliche Schallabstrahlung. Vor allem freistehende Konstruktionen, wie zum Beispiel Lamellen, die einer Fassade vorgesetzt sind, können unter einer bestimmten Windanströmung anfangen zu schwingen. Diese Schwingungen müssen noch nicht zwangsläufig zu einer Schallabstrahlung führen. Unter bestimmten und durchaus zufälligen Bedingungen, kann die Struktur dazu angeregt werden, Töne abzustrahlen. Bei der Untersuchung von Lamellen oder ähnlichen stabförmigen Strukturen ist die Länge der zu untersuchenden Objekte von Bedeutung, da eventuelle Eigenschwingungen angeregt werden, die sich in der Frequenz mit der Objektlänge verschieben. In Bild 8 ist ein Aufbau mit einer vorgesetzten Lamellenkonstruktion zu sehen, die ebenfalls im Hallraum nach dem Expansionstrichter aufgebaut wurde.

Dieser Aufbau ermöglicht es natürlich nicht, die ganze Struktur gleich anzuströmen, jedoch kann dieser Umstand ebenfalls dem realen Umfeld an einem Gebäude entsprechen und liefert so wichtige Erkenntnisse zu möglichen Strömungsgeräuschen. Bei der Anströmung der Fassade in Bild 8 mit verschiedenen Windgeschwindigkeiten und unter Variation der Anströmwinkel, konnte bei diesem Aufbau ein leichtes Pfeifen bzw. Summen festgestellt werden. Dieser Pfeifton war nicht besonders laut ausgeprägt, ca. 3 dB Pegelerhöhung gegenüber dem sonst breitbandigen Rauschen, aber er konnte sehr deutlich wahrgenommen werden. Eine Ursachenanalyse ergab, dass die Eigenschwingung der Lamellen, angeregt mit einem Impulshammer, sehr gut mit der windinduzierten Anregung der Lamellen übereinstimmt. In Bild 9 ist die Beschleunigung an einem ausgewählten Messpunkt mit der Anregung eines Impulshammers und der windinduzierten Anregung über dem Frequenzbereich aufgetragen.

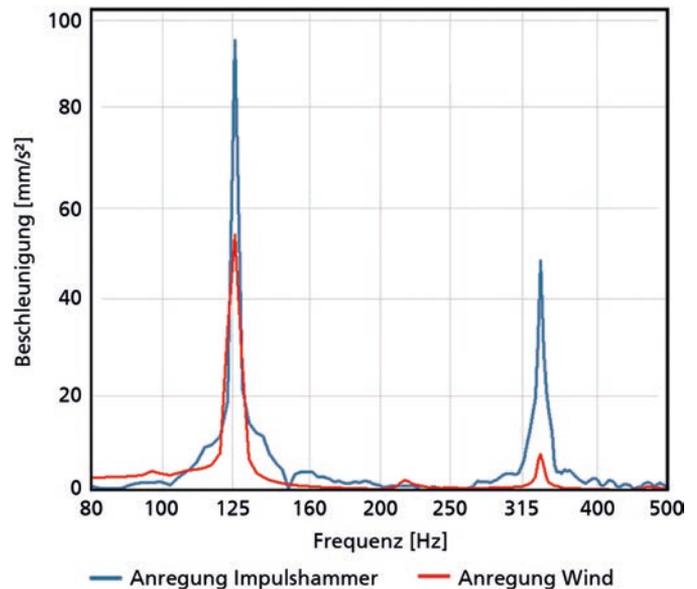


Bild 9. Darstellung der Schwingung auf einer Lamelle, angeregt mit Impulshammer und durch Wind.

Fig. 9. Plot of the vibration on a fin, stimulated with impulse hammer and by wind.

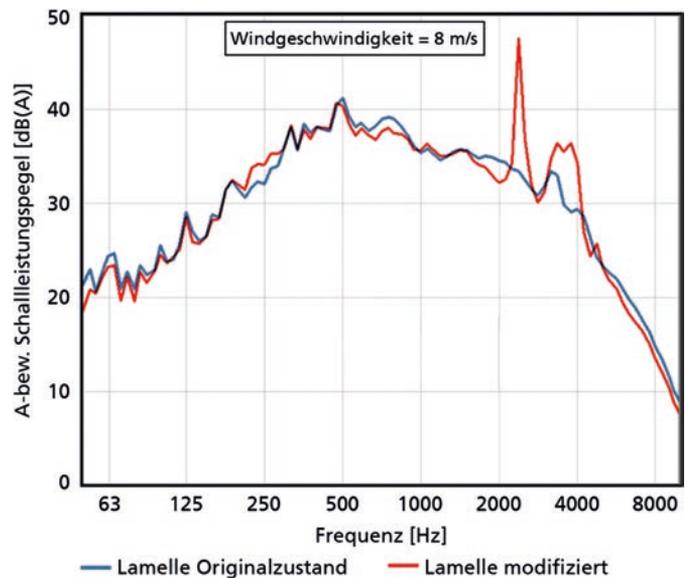


Bild 10. A-bewertete Schalleistung einer Fassadenanordnung mit einer signifikanten tonalen Komponente.

Fig. 10. A-weighted Sound Power Level of a façade layout with a significant tonal component.

Diese Analyse verdeutlicht sehr gut, dass Wind auf einer Fassade die Eigenschwingungen von einzelnen Strukturen sehr gut anregen kann und diese Eigenschwingungen ebenfalls wieder als akustisches Signal abgestrahlt werden können. In diesem dargestellten Fall konnte der Pfeifton mithilfe einer Querverstrebung, welche das Gesamtbild nicht wesentlich änderte, unterbunden werden. Mit den gewonnenen Erkenntnissen aus dieser Untersuchung im Windkanal konnte die Maßnahme an der Fassadestruktur rechtzeitig und kostengünstig umgesetzt werden, bevor die Fassade an das Gebäude angebracht wurde.

In Bild 10 ist ein weiteres Beispiel für eine Lamellenkonstruktion dargestellt. Die untersuchte Struktur konnte

aufgrund ihrer Dimensionen direkt in den Windkanal eingebaut werden. Die Lamellen hatten einen Aufbau, der mit Strukturen von Wetterschutzgittern zu vergleichen ist. Die untersuchte Struktur sollte als vorgesetzte Fassade mit einem bestimmten Abstand vor einem Wohngebäude installiert werden. Auszugsweise sind die A-bewerteten Schallleistungspegel bei einer Anströmgeschwindigkeit von 8 m/s dargestellt. Bei dieser Windgeschwindigkeit bildete sich eine sehr markante tonale Komponente aus, welche auch bei anderen Windgeschwindigkeiten gut hörbar war.

Die rote Kurve in Bild 10 stellt den Ist-Zustand dar und die blaue Kurve eine modifizierte Variante. Mit der Modifikation konnte die tonale Komponente fast komplett unterdrückt werden. Anhand der daraus abgeleiteten Hinweise änderte der Fassadenbauer die geplante Konstruktion ab.

7 Fazit

Die gezeigten Beispiele stellen nur einen kleinen Teil der bereits durchgeführten Untersuchungen im Windkanal dar und dienen zur Veranschaulichung der Tatsache, dass Windgeräusche an Fassaden sehr vielfältige Ursachen und Auswirkungen haben können. Windgeräusche können tonhaltige sowie auch breitbandige Pegelerhöhungen erzeugen und die direkte sowie nähere Umgebung akustisch beeinträchtigen. Zudem können Strukturschwingungen entstehen und sich zu einer akustischen Geräuschquelle entwickeln. Aus diesen Gründen sind akustische Voruntersuchungen an Fassaden bzw. an Fassadenausschnitten in

einem Windkanal eine sinnvolle Maßnahme. Werden solche Voruntersuchungen durchgeführt, bevor eine Fassade in vollem Ausmaß gefertigt und angebracht wird, können die geräuschintensiven Strukturen ermittelt werden. An modellhaften Aufbauten kann mit vergleichsweise wenig Aufwand eine Fassade akustisch beurteilt und wenn nötig optimiert werden. Somit bieten akustische Messungen an Fassaden in einer Laborumgebung wichtige Hinweise für die Planung und Umsetzung im Fassadenbau.

Literatur

- [1] IBP Mitteilung 451: Lärminderung und reflexionsarme Auskleidungen in aero-akustischen Windkanälen; 2004.
- [2] DIN EN ISO 3741: Akustik – Bestimmung der Schallleistungs- und Schallenergiepegel von Geräuschquellen aus Schalldruckmessungen – Hallraumverfahren der Genauigkeitsklasse 1 (Januar 2011).
- [3] DIN EN ISO 7235: Akustik – Labormessungen an Schalldämpfern in Kanälen – Einfügungsdämpfung, Strömungsgeräusch und Gesamtdruckverlust (Januar 2010).

Autoren dieses Beitrages:

Dipl.-Ing. (FH) Wolfgang Herget, wolfgang.herget@ibp.fraunhofer.de
Dr. Peter Brandstätt, peter.brandstaett@ibp.fraunhofer.de

Alle:

Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP)
Abteilung Akustik
Nobelstraße 12
70569 Stuttgart



Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP

Stuttgart

Postfach 80 04 69 – 70504 Stuttgart

Nobelstraße 12 – 70569 Stuttgart

Holzkirchen

Postfach 11 52 – 83601 Holzkirchen

Fraunhoferstraße 10 – 83626 Valley

www.ibp.fraunhofer.de