

# Untersuchungen zur Lärmentstehung und -abstrahlung von Lüftungsanlagen

P. Horn<sup>1</sup>, S. Kniesburgers<sup>3</sup>, J. Grabinger<sup>2</sup>, S. Becker<sup>3</sup>, R. Lerch<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Sensorik und  
Erlangen Graduate School in Advanced Optical Technologies (SAOT), 91052 Erlangen Deutschland

Email: Peter.Horn@lse.eei.uni-erlangen.de

<sup>2</sup> Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Sensorik, 91052 Erlangen Deutschland

<sup>3</sup> Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Prozessmaschinen und Anlagentechnik

## Einleitung

Lüftungsanlagen finden heute nicht nur in technischen Anlagen, sondern auch im Wohnbereich und damit in Ruhezeiten Anwendung. Dadurch rücken neben den Leistungsdaten für die Belüftung zunehmend die Geräuschemissionen in den Vordergrund. Ziel dieses Beitrags ist es, die Strukturschwingungen und den dadurch erzeugten Luftschall an handelsüblichen Lüftungskanälen zu untersuchen. Die Messergebnisse werden mit Finite-Elemente-Simulationen verglichen. Lüftungskanäle mit rechteckigem Querschnitt werden in der industriellen Praxis aus gebogenen Blechteilen gefertigt, die durch Falzen gefügt werden. Um die einzelnen Kanalelemente verbinden zu können, müssen darüber hinaus Flansche angesetzt werden. Diese für die Herstellung notwendigen Elemente führen bezüglich der Strukturschwingungen zu einer erhöhten Komplexität. In diesem Beitrag werden Rechteckkanäle mit quadratischem Querschnitt, einer inneren Kantenlänge von 15 cm und einer Länge von 50 cm untersucht. Sie bestehen aus zwei verzinkten Stahlblechteilen mit 0,84 mm Wandstärke und den beiden Flanschen. Für die Herstellung wird das größere Blechteil zu einem „U“ gebogen und das Zweite mit den beiden Schenkeln des „U“ durch Falzen zusammengefügt.

## Theoretische Grundlagen

Für ideale Kanäle ohne Toleranzen und die für die Fertigung notwendigen Strukturen wie Bördelkanten und Überlappungen kann die Grundmode eines Rechteckkanals über das Verhalten der vier identischen Kanalseiten abgebildet werden [3]. Mit den gemessenen Werten der Blechflächen von  $L = 0,48$  m,  $b = 0,146$  m,  $h = 0,84 \cdot 10^{-3}$  m und typischen Werten für Stahlblech von  $E = 2,1 \cdot 10^5 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$ ,  $\mu = 0,29$  und  $\rho = 7872 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$  ergibt sich nach [3] die Frequenz der Grundmode zu 100,2 Hz.

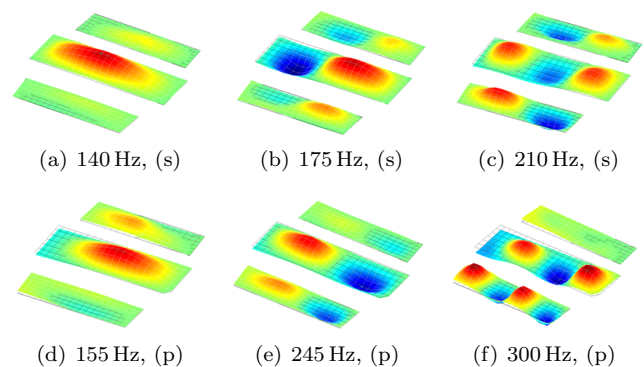
## Modellaufbau

Im Folgenden wird der Versuchsaufbau beschrieben, mit dem die Messungen zum Schwingungsverhalten der Kanäle durchgeführt wurden. Das zu untersuchende Kanalelement wurde einseitig so eingespannt, dass es translatorisch keinen und rotatorisch einen Freiheitsgrad besitzt. Das andere Ende des Kanals wurde mittels eines Schwingungserregers mit einer konstanten Auslenkung von 1  $\mu\text{m}$  ausgelenkt. Es erfolgte eine sinusförmige Anregung bei diskreten Frequenzen. Zum Vermessen

der Oberflächenschwingungen kam ein Laser-Scanning-Vibrometer zum Einsatz. Dieses ermöglicht es, Oberflächengeschwindigkeiten an mehreren vorher definierten Punkten zu messen und die Oberflächenschwingungen räumlich aufzulösen. Um möglichst viel Information über die Schwingungscharakteristik der Kanäle zu gewinnen, wurden die Seitenflächen über eine Spiegelanordnung vermessen. Der Messstrahl des Lasers wird umgelenkt und ermöglicht so das Vermessen von drei Kanalseiten in einem Messzyklus.

## Schwingungsmoden

Die Grundmode (ohne Abbildung) findet sich in guter Übereinstimmung mit dem oben berechneten Wert bei 105 Hz. Abbildung 1 zeigt Ergebnisse der Schwingungsmessung bei ausgewählten Frequenzen und bei zwei unterschiedlichen Anregungsrichtungen. Für die Messungen 1(a) bis 1(c) wurde der Kanal mit dem eingefalzten Blech obenliegend eingespannt. Die Anregung erfolgt also senkrecht zu dieser Fläche. Die Ergebnisse 1(d) bis 1(f) zeigen hingegen das Verhalten bei paralleler Anregung (eingefalztes Blech zeigt zur Seite). Vergleicht man zunächst die



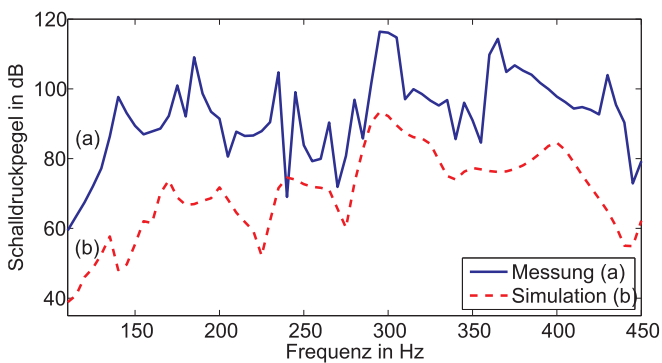
**Abbildung 1:** Schwingungsbilder bei verschiedenen Frequenzen und zwei unterschiedlichen Anregungsrichtungen: Abbildungen 1(a) bis 1(c) mit Anregung senkrecht (s) zu eingefalztem Blech, 1(d) bis 1(f) parallel (p) dazu.

Schwingungsbilder bei gleicher Anregungsrichtung 1(a) bis 1(c), so stellen sich für 140 Hz und 175 Hz für alle drei Seiten des Kanals übereinstimmende Moden ein. Dieses Verhalten entspricht dem, das auch für ideale Kanäle berechnet wird. Schon für 210 Hz jedoch zeigen die drei Kanalseiten unterschiedliche Moden. Die Seitenflächen schwingen hier im Vergleich zur obenliegenden eingefalz-

ten Fläche in der vorhergehenden Mode. Dieses Verhalten widerspricht der Annahme für ideale Kanäle, bei denen sich alle Seiten stets gleich verhalten. Bei geänderter Anregungsrichtung (Abb. 1(d) bis 1(f)) bilden sich für 155 Hz und 245 Hz zunächst ebenfalls für alle drei vermessenen Seiten die gleichen Moden aus. Die Frequenzen, bei denen diese auftreten, haben sich jedoch durch die geänderte Anregungsrichtung verschoben. Darüber hinaus zeigt Abb. 1(f) für 300 Hz deutlich die Unsymmetrie, die durch die eingefalzte Deckelfläche entsteht. Die Deckelfläche (in Abb. 1(f) rechts) wird bei 300 Hz zu keiner ausgeprägten Eigenschwingung angeregt.

## Schallabstrahlung

Die Messung der Schallabstrahlung erfolgte mit der gleichen schon bei den Schwingungsmessungen vorgestellten Versuchsanordnung. Die Messungen wurden im reflexionsarmen Vollraum [2] des Lehrstuhls für Sensorik der Universität Erlangen-Nürnberg durchgeführt. Gemessen wurde der Schalldruck innerhalb des Kanals 5 cm vom eingespannten Ende entfernt bei beidseitig offenem Kanal. Die Messposition lag mittig im Kanalquerschnitt. Kurve (a) in Abb. 2 zeigt den Verlauf des Schalldruckpegels über der Frequenz bei obenliegendem eingefalztem Blech. Die auftretenden Maxima und Minima lassen sich gut einzelnen Schwingungsmoden aus der Schwingungsmessung zuordnen. Beispiele sind Ergebnisse, die in Abb. 1(a) bis Abb. 1(c) gezeigt werden. Sie wurden bei gleicher Anregungsrichtung gemessen. Für 140 Hz und 175 Hz ergibt sich an der Messposition für den Schalldruck ein Maximum, wohingegen bei 210 Hz ein Minimum zu beobachten ist.



**Abbildung 2:** Messung (a) und Finite-Elemente-Simulation (b) des Schalldruckpegels an der Messposition

## Finite-Elemente-Simulation

Die Finite-Elemente-Simulationen wurden mit dem am Lehrstuhl für Sensorik der Universität Erlangen-Nürnberg entwickelten FE-Programm „CFS++“ („Coupled-Field-Simulation“) durchgeführt [1]. Dieses ermöglicht eine gekoppelte Simulation von mechanischem und akustischem Feld. Der Simulation liegt ein vereinfachtes geometrisches Modell des realen Kanals zugrunde. Die Stirnseiten wurden als ideal starr angenommen und so die Versteifung durch die Flansche abgebildet. Bördelkanten und Überlappungen wurden

vernachlässigt. Das Ergebnis ist in Abb. 2 durch Kurve (b) dargestellt. Die Simulation liefert dabei einen den Messungen tendenziell ähnlichen Verlauf. Jedoch liegen die Schalldruckpegel deutlich niedriger. Die Abfolge und Ausprägung der ersten Maxima bei 135 Hz, 155 Hz und 170 Hz stimmen gut mit den Messergebnissen überein. Auch die in der Simulation berechneten Schwingformen entsprechen für diese Frequenzen gut den Messungen. Für höhere Frequenzen ergeben sich aus der Simulation dann jedoch andere Schwingformen als die, die aus den Messungen hervorgehen. Um bessere Simulationsergebnisse zu erzielen, ist ein detailgenauer Abbilden der mechanischen Strukturen des Kanals notwendig. Durch gezieltes Verändern der Steifigkeiten der Randbereiche der Bleche konnte erreicht werden, dass die simulierten Schwingformen einzelner Seiten gut zu den gemessenen passen. Um das Gesamtverhalten korrekt nachzubilden, ist jedoch ein äußerst präzises Auflösen der Kanten notwendig, die das Zusammenwirken der einzelnen Seiten entscheidend beeinflussen. Dies ist besonders aufgrund der Fertigungstoleranzen nur schwer möglich.

## Zusammenfassung

In diesem Beitrag wurde ein Messaufbau vorgestellt, der es ermöglicht, die komplexen Strukturschwingungen industriell gefertigter Lüftungskanäle abzubilden. Die gemessenen mechanischen Eigenmoden finden sich dabei im abgestrahlten Luftschall sehr gut wieder. Die analytisch berechnete Grundmode konnte messtechnisch bestätigt werden. Zusätzlich wurde eine Finite-Elemente-Simulation auf Basis eines stark vereinfachten Modells durchgeführt, die für niedrige Modenordnungen bereits zufriedenstellende Ergebnisse liefert. Es wurde erläutert, dass ein detaillierteres Abbilden der mechanischen Struktur zu einer besseren Übereinstimmung zwischen Simulation und Messung führen würde.

## Danksagungen

Die Autoren danken der Bayerischen Forschungsförderung (BFS) für die Finanzierung des Projektes im Rahmen des Forschungsverbundes „FORLärm“.

Die Autoren danken der „Erlangen Graduate School in Advanced Optical Technologies“ (SAOT) der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die Unterstützung.

## Literatur

- [1] M. Kaltenbacher. Advanced simulation tool for the design of sensors and actuators. *Procedia Engineering*, 5:597–600, 2010.
- [2] Reinhard Lerch, Gerhard Sessler und Dietrich Wolf. *Technische Akustik*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2009.
- [3] S Liang, H Chen, und T Liang. An analytical investigation of free vibration for a thin-walled regular polygonal prismatic shell with simply supported odd/even number of sides. *Journal of Sound and Vibration*, 284(1-2):520–530, June 2005.