

EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN DES INDUIZIERTEN VIBRATIONSLÄRMS BEI DER ÜBERSTRÖMUNG EINER FLEXIBLEN PLATTENSTRUKTUR

S. Müller, Lehrstuhl für Strömungsmechanik, 91058 Erlangen, Deutschland

Zusammenfassung

Die Schallabstrahlung bei der Überströmung einer flexiblen Plattenstruktur ist geprägt von der durch die Strömung induzierten Strukturschwingung. Diese Strukturschwingung produziert im Fernfeld markante tonale Schallkomponenten, aber auch zusätzliche Breitbandgeräusche. Der Schwerpunkt der Untersuchungen liegt auf einer Unterdrückung des tonalen Schalls. Durch verschiedene Hindernisgeometrien vor der flexiblen Platte werden unterschiedliche Anströmbedingungen generiert und der Einfluss auf das Schwingungsverhalten analysiert. Um einen direkten Zusammenhang zwischen Strömungsfeld, Plattenschwingung und Schallabstrahlung herstellen zu können, werden verschiedene Messverfahren benutzt. Die Erfassung der Strukturschwingung erfolgt mit Hilfe von Laser-Doppler-Vibrometern, für die Geschwindigkeitsmessungen werden die Laser-Doppler-Anemometrie und die Hitzdrahtanemometrie eingesetzt. Das Schallfeld wird über Fernfeldmikrofone ermittelt. Die Ergebnisse zeigen, dass es möglich ist, durch spezielle Hindernisgeometrien in der Anströmung eine Verringerung der tonalen Schallabstrahlung zu erzielen. Alle experimentellen Untersuchungen stehen in Verbindung mit parallelen numerischen Arbeiten.

1. EINLEITUNG

Die alltägliche Lärmbelastung des Menschen hat in den vergangenen Jahrzehnten stark zugenommen. Ein Großteil der Lärmbelastung ist auf Vorgänge zurückzuführen, bei denen strömungsmechanische Prozesse die Basis bilden. Dazu gehört der Fluglärm, dem Anwohner großer Flughäfen im Umkreis von mehreren Kilometern ausgesetzt sind. Strömungsinduzierte Schallquellen werden durch die Triebwerke, aber auch durch Luftverwirbelungen, die am ausgefahrenen Fahrwerk und an Hocchauftriebshilfen entstehen, gebildet. Neben diesen so genannten Fluidschallquellen sind akustische Quellterme zu berücksichtigen, die aus strömungsinduzierten Strukturschwingungen am Rumpf von Flugzeugen und an den Landeklappen entstehen. Aufgrund der Umströmung der Flugzeuge, aber auch an Fahrzeugen, kommt es zu einer Interaktion zwischen Luftstrom und Außenhülle, die in hörbarem Fluid- und Strukturschall resultiert. Um derartige Geräuschemissionen effektiv reduzieren und kontrollieren zu können bedarf es einer fundierten Analyse und eines verbesserten physikalischen Verständnisses der komplexen Interaktion zwischen Fluid, Struktur und Akustik.

Arbeiten in der Literatur, die die gesamte Kette der Fluid-Struktur-Akustik Interaktion abbilden, sind nur vereinzelt vorhanden (siehe Vergne et al [1]). Die Bearbeitung der Thematik steht noch am Anfang.

2. VERSUCHSAUFBAU

Der Fokus dieser Untersuchungen lag auf den Lärmquellen im Bereich der Außenhülle von Flugzeugen und Fahrzeugen sowie der Landeklappen. Daher wurden an einem vereinfachten Modellaufbau die physikalischen Mechanismen der strömungsinduzierten Schallentstehung un-

tersucht. Ziel war es, die wesentlichen Merkmale des physikalischen Problems zu erfassen. Das zentrale Element ist eine überströmte flexible Platte, die zwischen zwei starren Platten bündig mit deren Oberfläche integriert ist. An der nicht überströmten freien Rückseite der Platte liegt Umgebungsdruck an, um mögliche Dämpfungen durch eine eingeschlossene Kavität zu vermeiden (Abb. 1).

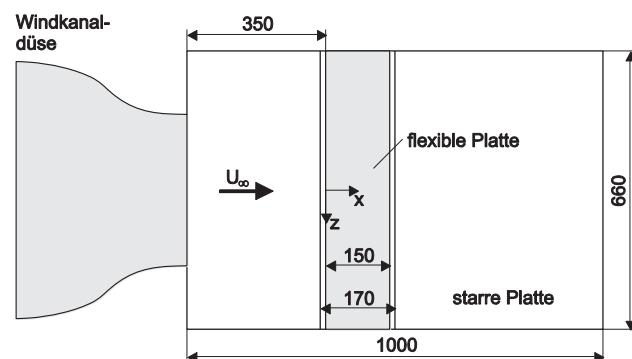


BILD 1. Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus (Maßangaben in mm)

Die Grundplatte besitzt eine Ausdehnung von $L = 1\ 000$ mm in Hauptströmungsrichtung und von $B = 660$ mm in Spannweitenrichtung sowie eine Höhe von $H = 45$ mm. Die dünne flexible Stahlplatte wird an zwei gegenüberliegenden Kanten auf einer Länge von jeweils 10 mm aufgespannt und hat in Strömungsrichtung eine Länge von 150 mm. Die Stahlplatte besitzt eine Dicke von $h = 40 \mu\text{m}$. Die Dichte beträgt $\rho = 7\ 855 \text{ kg/m}^3$, der Elastizitätsmodul $E = 2 \cdot 10^{11} \text{ N/m}^2$ und die Querkontraktionszahl entspricht $\nu = 0,3$. In Hauptströmungsrichtung wird eine Vorspannung der flexiblen Platte von $\sigma = 7 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2$ aufgeprägt.

Um einen möglichst breiten Reynoldszahlbereich während der Untersuchungen zu erfassen wurde die Anströmgeschwindigkeit U_∞ zwischen 10 m/s und 40 m/s variiert. Veränderungen der Turbulenz der Zuströmung wurden durch den Einsatz verschiedener Hindernisgeometrien vor der flexiblen Platte erzielt, welche mit unterschiedlichen Abständen zwischen Hindernis und flexibler Platte (300 mm und 0 mm) bzw. zwischen Hindernis und starrer Platte (0 mm, 10 mm und 20 mm) in der Zuströmung positioniert wurden. Alle Hindernisse sind aus Aluminium, mit Ausnahme eines Hindernisses. Dieses besteht aus einem weicheren Gummimaterial. Die hier durchgeföhrten Untersuchungen konzentrieren sich auf eine Referenzkonfiguration ohne Hindernis in der Zuströmung (Abb. 2(a)), auf einen Vierkantzyylinder mit einer Kantenlänge von 20 mm (Abb. 2(b)) sowie eine Gummilippe mit einer Höhe von 20 mm (Abb. 2(c)). Die Positionierung der Störkörper erfolgte unmittelbar vor der flexiblen Platte und bündig mit der Oberfläche der starren Platte.

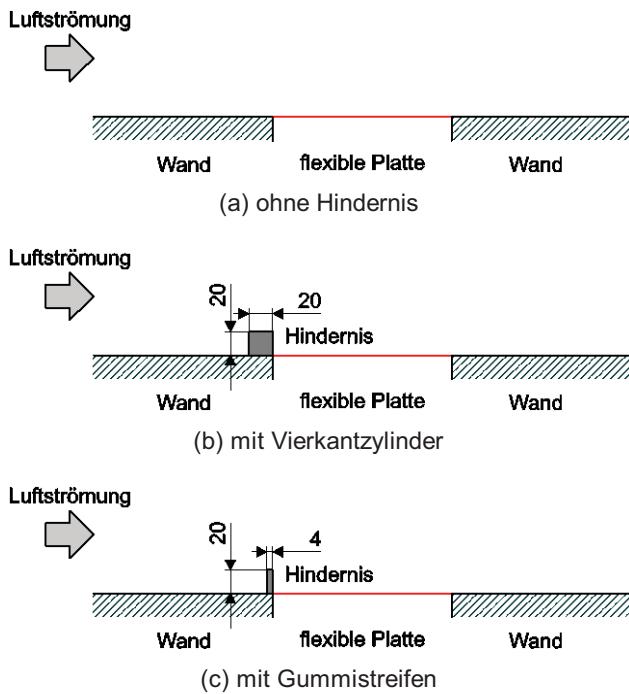


BILD 2. Konfigurationen zur Generierung verschiedener Anströmbedingungen (Maßangaben in mm)

3. EXPERIMENTELLE METHODEN

Alle Akustikmessungen und die Schwingungsmessungen an der flexiblen Platte wurden im Akustikwindkanal der Universität Erlangen-Nürnberg durchgeföhr (Abb. 3). Der Kanal ist in einem schalltoten Raum integriert, dessen Wände mit Schall absorzierenden Keilen ausgekleidet sind (reflexionsarmer Raum). Eine Beschreibung des Akustikwindkanals erfolgt in Hahn et al [2]. Für die Strömungsuntersuchungen mittels Laser-Doppler-Anemometrie wurde aufgrund von Verschmutzungsproblemen der Windkanal des Lehrstuhls für Strömungsmechanik benutzt (siehe Becker et al [3]).

Die Erfassung der Strukturschwingungen erfolgte mit zwei Laser-Doppler-Vibrometern. Ein Laser-Scanning-Vibrometer lieferte automatisiert die Schwingungen an

mehreren Positionen auf der Oberfläche der flexiblen Platte, während mit einem zweiten Laser-Vibrometer kontinuierlich die Oberflächenschwingung an einem zentralen Referenzpunkt erfasst wurde. Das Signal des Referenzpunkts wurde als Bezugssignal verwendet. Eine Kohärenzanalyse zwischen dem kontinuierlichen Referenzsignal und den Messsignalen an den anderen Punkten ermöglichte die Ableitung frequenzabhängiger Phasenbeziehungen zwischen allen Messpunkten. Daraus konnte die frequenzabhängige Visualisierung der Schwingungsmuster der Plattenoberfläche gebildet werden.

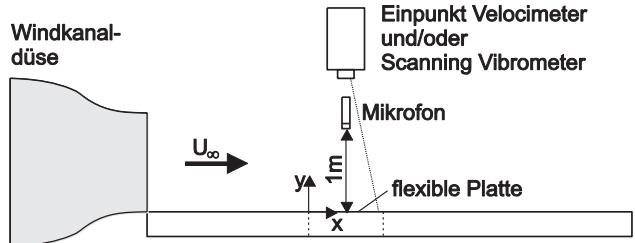


BILD 3. Versuchsaufbau im Akustikwindkanal

Die Anwendung des RIFF-Verfahrens ergab die Rekonstruktion der frequenzabhängigen Druckverteilungen über der Plattenoberfläche. RIFF steht für „Résolution Inverse Filtrée Fenétrée“. Es handelt sich um ein inverses Verfahren zur Berechnung der Flächenlasten aus frequenzabhängigen Verschiebungsfeldern einer beweglichen Oberfläche. Als Grundgleichung des RIFF-Verfahrens wird die Bewegungsgleichung einer Platte verwendet:

$$(1) \quad \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} \left[\frac{\partial^4 w}{\partial x_1^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x_1^2 \partial x_2^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial x_2^4} \right] \rho h \omega^2 w = p(x_1, x_2, \omega).$$

Diese Gleichung beschreibt für die erzwungene Schwingung einer Platte bei einer diskreten Frequenz $f = \omega/2\pi$ den Zusammenhang zwischen den Verschiebungen senkrecht zur Ruhelage der Oberfläche $w = w(x_1, x_2, \omega)$ und der treibenden Flächenlast $p = p(x_1, x_2, \omega)$. x_1 und x_2 entsprechen den Koordinaten auf der Plattenoberfläche. Die frequenzabhängige Verteilung der Schwingungsamplitude bzw. der Verschiebungen der Plattenoberfläche erfolgt berührungslos durch eine Messung des Schwingungsverhaltens der Struktur mit einem Laser-Scanning-Vibrometer. Die vierten Ableitungen werden durch einen Finite-Differenzen-Ansatz approximiert.

Aufgrund des Ansatzes zur Berechnung der Flächenlasten ergeben sich von den Strukturparametern unabhängige, vergleichbare, frequenzabhängige, räumliche Druckverteilungen. Sie bilden die Ursache der strömungsinduzierten Strukturbewegung.

Die gemessenen Verschiebungen ergaben einen stetig vorhandenen Rauschanteil. Dadurch trat bei der Approximation der höheren Ableitungen eine Verstärkung der kleinen Fehler auf. Zur Bereinigung der Ergebnisse wurden eine Fensterung und eine Filterung auf die ermittelte Flächenlast angewandt. Die multiplikative Fenstertechnik diente zur Reduzierung der Unstetigkeiten an den Plattenrändern. Da das Rauschen besonders im Bereich hoher

Wellenzahlen auftritt, wurde eine Tiefpass Wellenzahlfilterung zur Reduzierung der unsauberen Komponenten der berechneten Lastverteilung durchgeführt (siehe Pezerat et al [4], [5]).

Zum Vergleich der Ergebnisse erfolgten instationäre Wanddruckmessungen. Dazu wurde die flexible Platte in Abb. 1 durch eine starre Aluminiumplatte der Höhe $h = 10$ mm ersetzt. Die Ausdehnung der starren Platte in Strömungsrichtung sowie in Spannweitenrichtung war identisch zur flexiblen Platte. Die Sonden zur Messung des instationären Wanddrucks wurden an diskreten Positionen in Bohrungen der starren Aluminiumplatte eingesetzt. Das Messgitter der Druckmessungen entsprach Messpunkten der Laser-Vibrometermessungen.

Zur Charakterisierung der komplett dreidimensionalen turbulenten Geschwindigkeitsfluktuationen über der flexiblen Platte wurde die Hitzdrahtanemometrie benutzt. Mittels einer 3-Draht-Sonde erfolgte die zeitgleiche Messung der Geschwindigkeitsschwankungen in 10 mm und 20 mm Abstand zur flexiblen Platte entlang der Strömungsrichtung an diskreten Messpunkten. Es ermöglichte die Bestimmung des gesamten Reynoldsschen Spannungstensors. Aus Reynoldsschen Spannungen wurde die Anisotropie der Turbulenz bestimmt und im Invariantendiagramm dargestellt (siehe Jovanovic [6]).

Zur Auflösung der instationären Geschwindigkeitsverteilungen über der flexiblen Struktur wurden die Laser-Doppler-Geschwindigkeitsmessungen phasenaufgelöst durchgeführt. Die Bezugsbasis bildete die Schwingungsperiode der Platte. Es erfolgte somit eine Kopplung der LDA-Messungen mit den Vibrometermessungen.

Das kontinuierliche Geschwindigkeitssignal vom Vibrometer bildete die Eingangsgröße für den Trigger. Ohne Eingangssignal gibt der Trigger an den Nulldurchgängen mit positiver Steigung einer Schwingung mit der ersten Eigenfrequenz der flexiblen Platte ein Signal aus. Liegt an dem Trigger ein Eingangssignal an, detektiert ein Tracker die Abweichung von der erwarteten Eigenfrequenz, woraus sich die aktuell vorliegende Schwingungsfrequenz ergibt. Die Frequenz des Triggerausgangssignals wird kontinuierlich an die detektierte Frequenz angepasst und entspricht der aktuellen Periodenlänge.

Das Ausgangssignal des Triggers bildet die Referenz für das LDA-System. Jede detektierte Periodenlänge wurde in eine gleiche Anzahl von Zeitfenstern unterteilt. Die Geschwindigkeitswerte aus gleichen diskreten Zeitfenstern, wurden an einem Messpunkt über alle Perioden gemittelt. Es resultieren phasenaufgelöste Geschwindigkeitsverteilungen während einer Schwingungsperiode.

4. ERGEBNISSE

Am Anfang der Untersuchung standen umfangreiche Untersuchungen des abgestrahlten Schalldrucks in Abhängigkeit von der Anströmgeschwindigkeit und den Turbulenzeigenschaften in der Zuströmung. Die Turbulenzeigenschaften wurden mit Hilfe verschiedener Hindernisgeometrien gezielt verändert. Aufgrund der großen Datenmenge erfolgt eine Beschränkung der Auswertung auf zwei repräsentative Geometrien, den Vierkantzyylinder und die Gummilippe. Als Referenz für die Akustikmessungen wird in den Untersuchungen die Schallabstrahlung der leeren Messstrecke sowie der Konfiguration ohne Hindernis in der Zuströmung herangezogen.

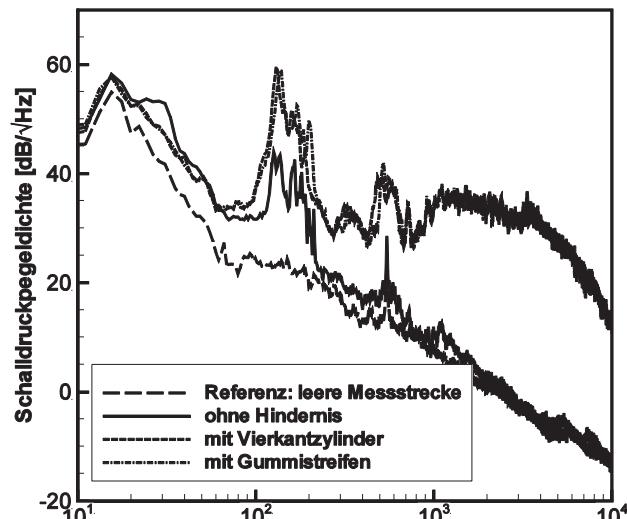
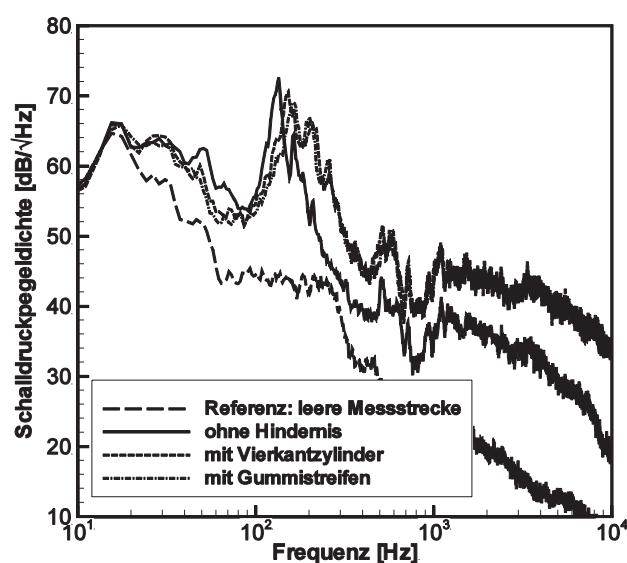
(a) $U_{\infty} = 20 \text{ m/s}$ (b) $U_{\infty} = 40 \text{ m/s}$

BILD 4. Gemessene Schalldruckpegeldichte

Der Referenzfall bei leerer Messstrecke und $U_{\infty} = 20 \text{ m/s}$ hat in der Schalldruckpegeldichte (Abb. 4(a)) einen Peak der auf grundlegende akustische Eigenschaften des Windkanals zurückzuführen ist. Im Vergleich zur leeren Messstrecke führt der Fall der flexiblen Platte ohne Hindernis zu mehreren Überhöhungen im Bereich zwischen 100 Hz und 200 Hz, was die Anregung der ersten Eigenfrequenz der flexiblen Platte von 115 Hz einschließt. Der weitere Verlauf unterscheidet sich nur geringfügig von der Schallabstrahlung der leeren Messstrecke. Befindet sich der Vierkantzyylinder in der Zuströmung, wird das Schalldruckspektrum von einem Peak bei ca. 115 Hz dominiert. Für höhere Frequenzen kann ein starker Anstieg im Breitbandrauschen beobachtet werden.

Abb. 4(b) zeigt für die gleichen Randbedingungen die Schalldruckpegeldichte bei $U_{\infty} = 40 \text{ m/s}$. Die Schalldruckpegel sind deutlich höher als für $U_{\infty} = 20 \text{ m/s}$. Das Schalldruckspektrum des Freistrahls zeigt keine Überhöhungen. Der Fall der flexiblen Platte ohne Hindernis besitzt im Vergleich zu $U_{\infty} = 20 \text{ m/s}$ einen dominanten

Peak bei ca. 115 Hz. Durch Einbringen eines Hindernisses in die Zuströmung tritt eine Überhöhung auf, welche niedriger und breiter als im Fall ohne Hindernis ist. Die Reduzierung der Höhe des Peaks bei ca. 115 Hz ist bei der Gummilippe stärker als bei dem Vierkantzyylinder ausgeprägt.

Das Ergebnis der Untersuchungen belegt, dass es möglich ist, durch eine kontrollierte Veränderung der Zuströmbedingungen, eine Verringerung des tonalen Schalldruckpegels in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit zu erzielen. Jedoch wird gleichzeitig der Breitbandrauschanteil erhöht, so dass der Gesamtpegel höhere Werte erreicht.

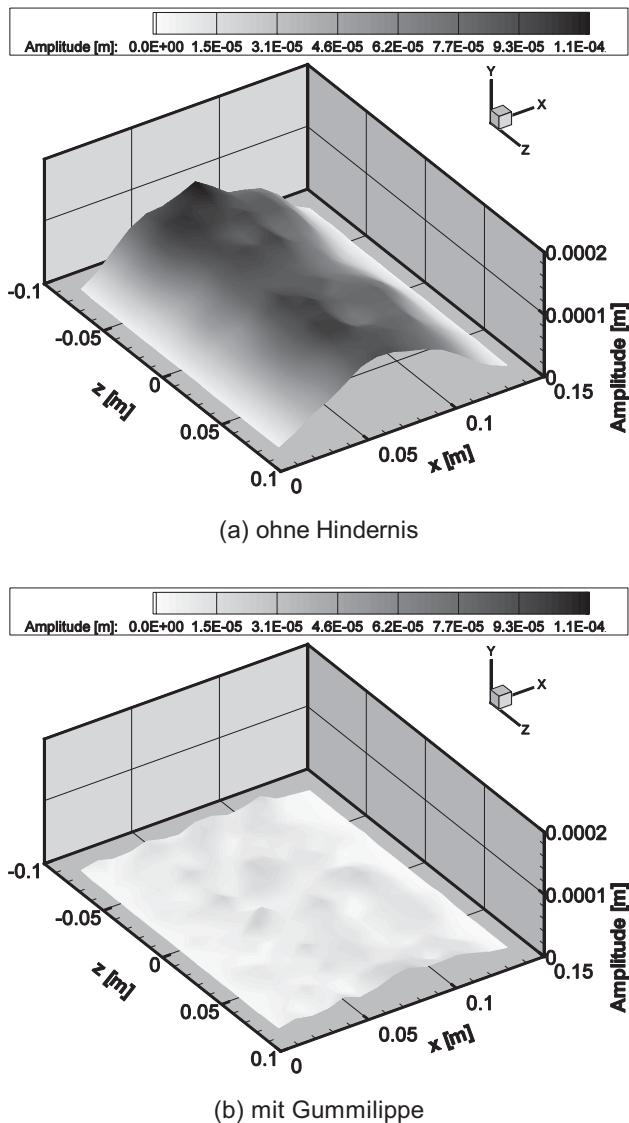


BILD 5. Verteilung der Schwingungsamplitude bei $f = 115 \text{ Hz}$, $U_\infty = 40 \text{ m/s}$

In den über die Plattenoberfläche bei verschiedenen Hindernissen gemittelten Spektren der Strukturauslenkung für $U_\infty = 40 \text{ m/s}$ treten die Überhöhungen bei leicht unterschiedlichen Frequenzen im Bereich 105 – 125 Hz auf, was darauf hindeutet, dass nicht eindeutig eine diskrete Eigenfrequenz angeregt wird. Ein Vergleich der Verteilung der Schwingungsamplitude der flexiblen Platte bei $f = 115 \text{ Hz}$ für den Fall ohne Hindernis mit dem Fall mit Gummilippe in der Zuströmung ist in Abb. 5 dargestellt. Ohne Hindernis wird die flexible Platte verstärkt im mittleren Bereich über die gesamte Spannweite ausgelenkt. Mit Gummilippe erfährt die flexible Platte eine diffuse Anregung mit lokal leicht erhöhten Amplitudenwerten, welche insgesamt geringer als im Fall ohne Hindernis sind. Eine äquivalente Verteilung zeigt sich für den Fall mit Vierkantzyylinder.

Zur Rekonstruktion der Wanddruckverteilung in Abb. 6(a) mittels RIFF wurden Schwingungsmessungen an 475 Messpunkten auf der Oberfläche der flexiblen Platte mit einem Laser-Doppler-Vibrometer durchgeführt. Die Wanddruckverteilungen liegen in einem Intervall von 2,5 Hz um $f = 115 \text{ Hz}$. Bei einer Anströmgeschwindigkeit von $U_\infty = 20 \text{ m/s}$ befand sich der Vierkantzyylinder unmittelbar vor der flexiblen Platte.

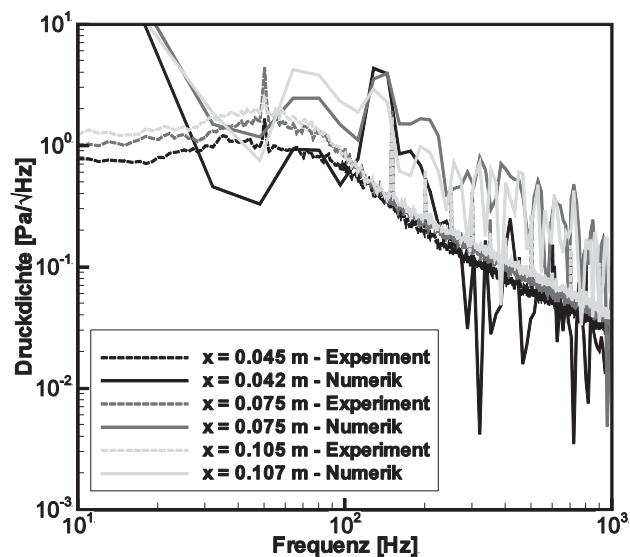
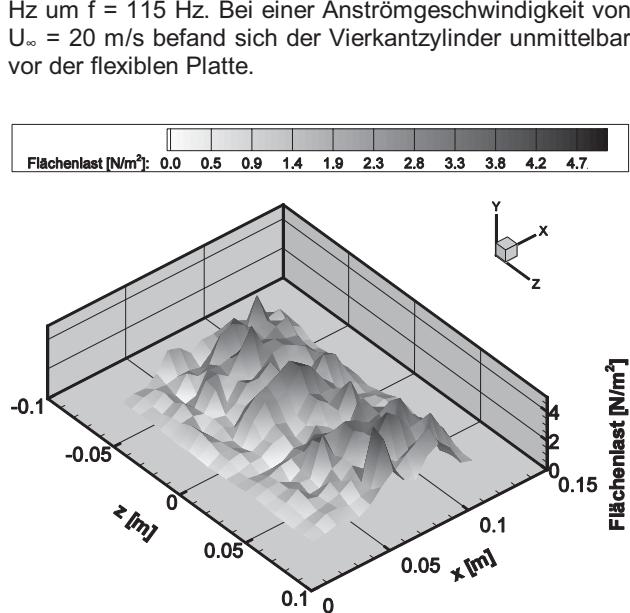


BILD 6. Test und Validierung des RIFF-Verfahrens für den Vierkantzyylinder bei $U_\infty = 20 \text{ m/s}$

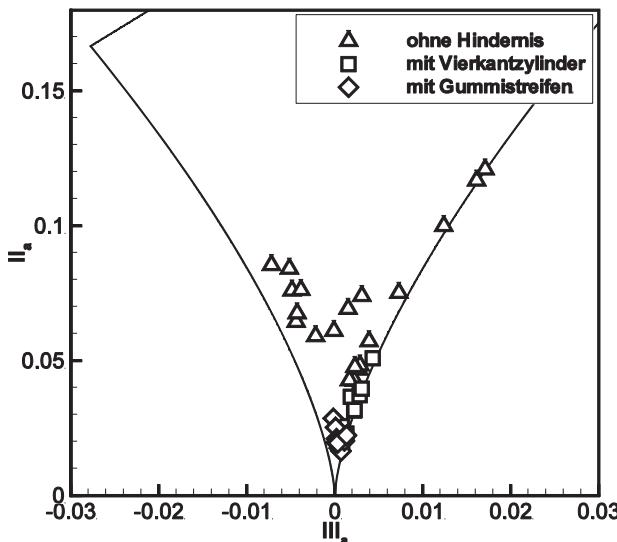


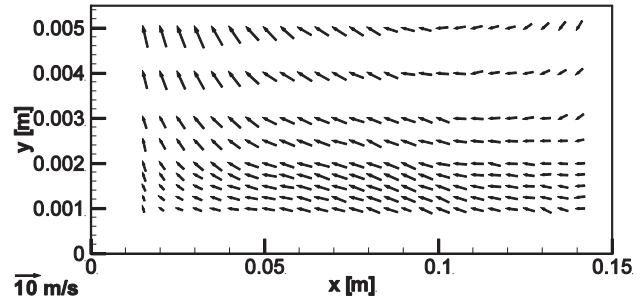
BILD 7. Invariantenkarde mit Drei-Komponenten-Hitzdrahtmessdaten für $U_\infty = 40 \text{ m/s}$

Im Vergleich zu den numerischen Simulationen sind in Abb. 6(b) die Frequenzspektren des gemessenen Wanddrucks dargestellt, wobei sich eine gute Übereinstimmung in der Größenordnung zwischen Numerik und Experiment zeigt. Die Spektren wurden jeweils an drei Punkten entlang der Strömungsrichtung bei $z = 0 \text{ mm}$ aufgezeichnet. Die Spektren des numerisch berechneten Wanddrucks zeigen bei ca. 115 Hz eine Überhöhung, was darauf zurückzuführen ist, dass es sich um eine voll gekoppelte Simulation der Fluid-Struktur-Interaktion handelte (siehe Becker et al [7]). Die Messungen hingegen erfolgten an einer starren Platte. Durch Integration der Kurvenverläufe über den Frequenzbereich 113,75 Hz – 116,25 Hz lässt sich ein direkter Vergleich mittels RIFF rekonstruierter Wanddruckwerte an entsprechenden Positionen anstellen. Es zeigt sich, dass die gemessenen Amplituden der Wanddruckschwankungen die mittels RIFF rekonstruierten Werte um den Faktor 2 unterschreiten bzw. die numerisch berechneten Werte um den Faktor 2 höher liegen.

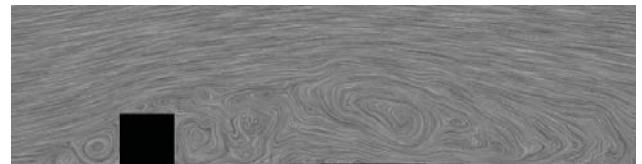
Für eine bessere Klassifizierung der Turbulenzeigenschaften des Strömungsfeldes über der flexiblen Platte wurden umfangreiche Hitzdrahtmessungen durchgeführt. Es wurde der komplette Reynoldssche Spannungstensor der Geschwindigkeitsfluktuationen bestimmt und hinsichtlich der Anisotropieeigenschaften analysiert. Abb. 7 zeigt die in eine Invariantenkarde eingetragenen Drei-Komponenten-Hitzdrahtmessdaten. Im Gegensatz zu dem Fall der flexiblen Platte ohne Hindernis finden sich die Fälle mit Hindernis unten mittig in der Invariantenkarde. Das bedeutet, dass die von den unmittelbar vor der flexiblen Platte positionierten Hindernissen generierte Turbulenz deutlich isotoper als die Turbulenz in der Grenzschicht der Plattenüberströmung ohne Hindernis ausgeprägt ist. Eine Eigenschaft von Strömungen mit isotropen Turbulenzeigenschaften liegt in sehr kurzen Korrelationslängen der turbulenten Strukturen. Dies führt zu einer unkorrelierten Anregung der flexiblen Platte und folglich zu einer Reduzierung der tonalen Überhöhung im Schallspektrum bei einer gleichzeitigen Verbreiterung der Überhöhung sowie zu mehr Breitbandrauschen als in der

besser korrelierten Strömung ohne Hindernis. Die Messwerte für den Fall mit Gummistreifen liegen deutlich näher am Isotopenpunkt (0,0) in der Invariantenkarde als im Fall mit Vierkantzyylinder was mit einer stärkeren Reduzierung der tonalen Komponente im Schallspektrum übereinstimmt (siehe Becker et al [7]).

Die Abb. 8 verdeutlicht die phasenaufgelöste Geschwindigkeitsverteilung über der schwingenden Struktur. Die Referenz für die Phasenauflösung bildet die Grundschwingung der Platte bei $f = 115 \text{ Hz}$. In der Abb. 8(a) ist als Beispiel die vektorielle Geschwindigkeitsverteilung für einen Phasenwinkel dargestellt. Da sich die flexible Platte im Rezirkulationsgebiet befindet, ist die Strömung durch eine starke Rückströmung geprägt. Abb. 8(b) zeigt in einer LIC-Strömungsvisualisierung das korrespondierende Ergebnis der numerischen Simulation bei gleichem Phasenwinkel. Die Bilder zu den weiteren Phasewinkeln unterscheiden sich nur geringfügig von den dargestellten. Über die Periodendauer der Grundschwingung der flexiblen Platte zeigt sich keine periodische Strömungsbewegung. Die Numerik lässt höherfrequente Verwirbelungen erkennen, welche anhand der durchgeföhrten LDA-Messungen nicht aufgelöst werden können.



(a) Experiment: Vektorplot der mittleren Strömungsgeschwindigkeit



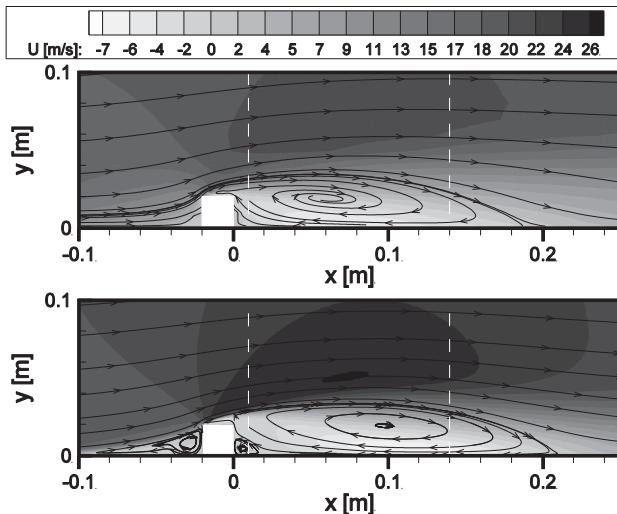
(b) Numerik: LIC-Strömungsvisualisierung

BILD 8. Phasenaufgelöster Strömungsverlauf mit Vierkantzyylinder bei $U_\infty = 20 \text{ m/s}$

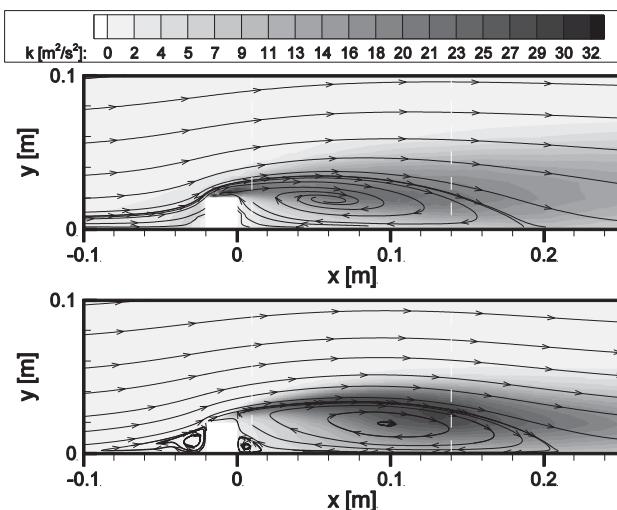
Die Ergebnisse verdeutlichen, dass keine großskaligen, periodischen Wirbelablösungen mit charakteristischen Eigenfrequenzen der flexiblen Platte vorhanden sind. Breitbandig verteilte turbulente Schwankungen führen, abhängig von der räumlichen Ausdehnung der Bereiche mit kohärenten Fluktuationen, zu einer Anregung der flexiblen Platte. Die resultierenden Schwingungsmuster korrelieren unterschiedlich stark mit den Eigenschwingungsformen der Struktur.

Ein direkter Vergleich des gemessenen mit dem numerisch berechneten gesamten mittleren Strömungsfelds ist in Abb. 9(a) dargestellt. Die Strömungsstruktur ist durch ein großes Rezirkulationsgebiet stromabwärts hinter dem Vierkantzyylinder charakterisiert. Die globale Überein-

stimmung zwischen Experiment und Numerik ist sehr gut. Die gemessene und die berechnete Länge des Rezirkulationsgebietes sind nahezu identisch. Oberhalb des Rezirkulationsgebietes liefert die Numerik etwas höhere Geschwindigkeitswerte in der Hauptströmung, was auf die Randbedingungen in der Numerik zurückzuführen ist.



(a) mittlere Geschwindigkeit in Hauptströmungsrichtung:
Experiment (oben) und Numerik (unten)



(b) Verteilung der turbulenten kinetischen Energie: Expe-
riment (oben) und Numerik (unten)

BILD 9. Vergleich des gemessenen und des berechne-
ten mittleren Strömungsfeldes mit Vierkantzyliner bei $U_{\infty} = 20 \text{ m/s}$

Die Verteilung der gemessenen und der berechneten turbulenten kinetischen Energie ergibt in beiden Fällen eine Erhöhung in der Scherschicht zwischen der Hauptströmung und dem Rezirkulationsgebiet (Abb. 9(b)). Für die LDA-Untersuchungen treten die Maxima direkt hinter der vorderen Ablösekante auf. In der Simulation kommt es weiter stromab zu einer Erhöhung. Der Grund für die spätere Transition ist einem stationären Geschwindigkeitsprofil als Eingangsbedingung in der Numerik begründet (siehe Becker et al [7]).

5. ZUSAMMENFASSUNG

Die Untersuchungen beinhalten experimentelle Arbeiten zur Bestimmung und Kontrolle des strömungsinduzierten Strukturlärms bei der Überströmung einer flexiblen, vorgespannten, dünnen Plattenstruktur. Die Ergebnisse belegen, dass durch Einbringen von verschiedenen Hindernissen vor der flexiblen Struktur eine Verringerung der tonalen niederfrequenten Frequenzen im Schallfeld erzielt werden kann. Die größte Reduzierung konnte durch eine flexible Gummistruktur (Gummilippe) erreicht werden. Jedoch werden Breitbandgeräusche erhöht und dementsprechend der Gesamtschallpegel. Die Referenz für die Modifikationen bildete die Schallabstrahlung bei einer Zuströmung ohne zusätzliches Hindernis.

Um einen direkten Zusammenhang zwischen Strömung und resultierender Strukturschwingung herstellen zu können, erfolgte eine Klassifizierung der Turbulenz über deren Anisotropieeigenschaften. Es zeigte sich, dass die Strömung bei Verwendung einer Gummilippe eine deutlich isotropere Turbulenzverteilung aufweist als bei den Vergleichsgeometrien. Dies kann als Indiz gedeutet werden, dass die Fluktuationen der Strömung weniger räumlich korreliert sind und im Wechselspiel mit der flexiblen Platte zu einer Verringerung der tonalen Schwingungskomponente führen.

Die Ergebnisse der phasenaufgelösten LDA-Untersuchungen zeigten keine großkaligen, periodischen Wirbelablösungen mit charakteristischen Eigenfrequenzen der flexiblen Platte, was auf breitbandig verteilte turbulente Schwankungen hindeutet. Je nach Hindernis treten unterschiedlich große Bereiche mit korrelierten Fluktuationen auf.

Auf der Basis der experimentellen Daten erfolgte ein Vergleich mit numerischen Simulationen. Gegenstand der Simulationen war neben der Berechnung des instationären Strömungsfeldes die Bestimmung der Strukturschwingung und des resultierenden Schallfeldes. Die Ergebnisse für das Geschwindigkeitsfeld belegen eine gute Übereinstimmung mit den LDA-Messungen des Modellexperiments.

Mit den Untersuchungen konnte eine Datenbasis geschaffen werden, die es erlaubt, wichtige physikalische Eigenschaften der Fluid-Struktur-Akustik Interaktion bei der Überströmung einer flexiblen Struktur zu klären.

DANKESWORTE

Die Untersuchungen werden gefördert von der Bayerischen Forschungsstiftung (BFS).

LITERATUR

- [1] VERGNE, S.; AUGER, J.-M.; PÉRIÉ, F.; JACQUES, A.; NICOLOPOULOS, D.: Aeolastic Noise. In: WAGNER, C. A.; HÜTTL, T.; SAUGAUT, P. (Hrsg.): *Large-Eddy Simulations for Acoustics*. New York: Cambridge University Press, 2007. S. 272-293.
- [2] HAHN, C.; BECKER, S.; ALI, I.; ESCOBAR, M.; KALTENBACHER, M.: Investigation of Flow Induced Sound Radiated by a Forward Facing Step. In: TROPEA, C.; JAKIRLIC, S.; HEINEMANN, H.-J.; HENKE, R.; HÖLLINGER, H. (Hrsg.): *New Results in Numerical and Experimental Fluid Mechanics VI*. Berlin: Springer, 2007. S. 438-445.

- [3] BECKER, S.; LIENHART, H.; DURST, F.: Flow around Three-Dimensional Obstacles in Boundary Layers. In: *J. Wind Eng.* (2002), Vol. 90, S. 265-279.
- [4] PEZERAT, C.; GUYADER, J. L.: Force Analysis Technique : Reconstruction of Force Distribution on Plates. In: *Acustica united with Acta Acustica* (2000), Vol. 86, S. 322-332.
- [5] PEZERAT, C.; TOTARO, N.; PACHEBAT, M.; GUYADER, J. L.: Experimental Indentification of a Boundary Pressure Field Induced by a Turbulent Flow from Plate Vibration Measurements. In: *Proceedings of ISMA2006 (September 18-20, 2006, Leuven, Belgien)*. - CD-ROM-Proceedings, S. 677-692.
- [6] JOVANOVIC, J.: *The Statistical Dynamics of Turbulence*. Berlin: Springer, 2006.
- [7] BECKER, S.; SCHÄFER, F.; MÜLLER, S.; UFFINGER, T.; GRABINGER, J.; KALTENBACHER, M.: Simulation and Experiments of the Fluid-Structure-Acoustic Interaction of a Flexible Structure in the Wake of a Square Cylinder. In: *Proceedings of 14th AIAA/CEAS Aeroacoustic Conference (May, 2008, Vancouver, Canada)*. - AIAA 2008-3058.