

Kontaktlose Messung der Einkopplung von Triebwerkslärm in eine Flugzeugstruktur mit Hilfe von MEMS-Sensor-Arrays

Matthias Weber, Frank Khelfa, Kay Kochan

ZAL Zentrum für angewandte Luftfahrtforschung GmbH, 21129 Hamburg, E-Mail: acoustics@zal.aero

Einleitung

Bei akustischen Bodentests an Flugzeugen kann der Eintrag des luftübertragenen Triebwerkslärms ($f = 200 \dots 800$ Hz) in die Struktur durch Beschleunigungsmessungen auf der Rumpf-Außenseite bestimmt werden. Dies ist jedoch mit großem Aufwand verbunden. Im Rahmen des Forschungsvorhabens Lufo V-2 (Flight-LAB) wird ein effizientes Messverfahren für vibrations- und schallinduzierte Strukturschwingungen entwickelt. Dabei werden die Schwingungen der Struktur kontaktlos über den an zwei Mikrofonen gemessenen Druckgradienten bestimmt. Neben Standard-Messmikrofonen wurden auch MEMS-Mikrofone eingesetzt. Zur Anregung eines Testpanels diente ein Schwingungserreger sowie ein Lautsprecher, der auf der Frontseite des Panels platziert wurde (siehe Abb. 1).

Anschließend wurde die Methode an einem voll skalierten akustischen Rumpfdemonstrator, dem Acoustic Flight LAB getestet, der von Airbus und der HAW Hamburg entwickelt wurde und im ZAL TechCenter in einem reflexionsarmen Raum zur Verfügung steht [1]. In diesem Experiment wurde ein Sensorarray, bestehend aus 8 MEMS-Mikrofon-Paaren, automatisiert entlang eines Viertels des Demonstrator-Umfangs bewegt. Die Anregung erfolgte mit einem Shaker und mit einem Lautsprecher-Array. Als Referenz diente eine Kartierung mit Beschleunigungsaufnehmern.

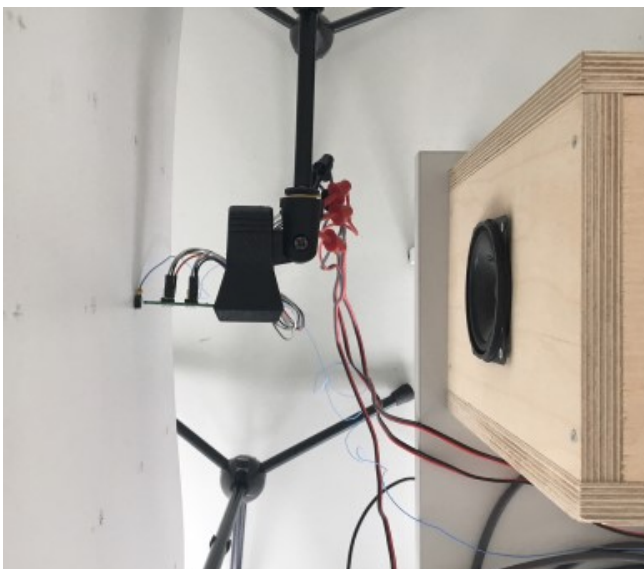


Abbildung 1: Schwingungsmessung an einem Leichtbaupanel mit Beschleunigungssensor und MEMS-Mikrofon-Paar. Die Anregung erfolgt durch einen frontseitigen Lautsprecher.

Kontaktlose Schwingungsmessung

Unter bestimmten Voraussetzungen (im sogenannten „Very Near Field“, siehe [2]) ist es möglich, von der Schallschnelle $u(t)$ in unmittelbarer Nähe einer Struktur auf die Strukturschwingungen zu schließen. Es gibt zwei Verfahren zur Messung der Luftschall-Intensität $I(t) = p(t) \cdot u(t)$, die hierfür in Frage kommen: Die p-u-Sonde misst die Schallschnelle über die von den Partikelbewegungen verursachten Temperaturschwankungen [3]. In [4] wurde die Anwendbarkeit dieses Verfahrens für kontaktlose Schwingungsmessung gezeigt. Die p-p-Sonde hingegen, üblicherweise als Intensitätssonde bezeichnet, bestimmt die Schallschnelle über den Gradienten des Schalldrucks, der über die zwischen zwei Mikrofonen mit Abstand Δr gemessene Druckdifferenz angenähert wird:

$$u_{pp} = -\frac{1}{\rho} \int \frac{p_1 - p_2}{\Delta r} dt \quad (1)$$

mit der Dichte der Luft ρ . In [5] wurde anhand eines Vorversuchs an einem per Schwingungserreger angeregten Sandwichpanel gezeigt, dass die Schwingungsformen des Panels mit dieser Methode, unter Zuhilfenahme zweier Messmikrofone, sehr gut zu rekonstruieren sind. Eine Wiederholung dieses Versuchs mit MEMS-Mikrofonen anstelle von Standard-Messmikrofonen (Mikrofonabstand $\Delta r = 0,02\text{m}$, Abstand vom Panel $0,01\text{m}$, Anregungssignal: weißes Rauschen) lieferte ebenfalls sehr gute Ergebnisse (siehe Abb. 2).

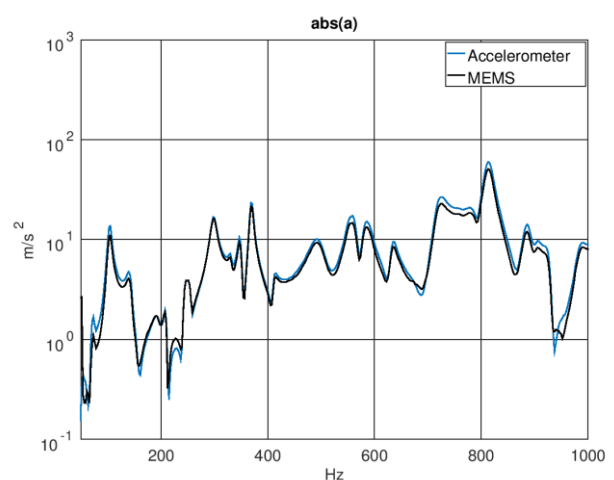


Abbildung 2: Vergleich der mit Accelerometer und MEMS-Gradientenmethode bestimmten Normalbeschleunigung des Panels an einer Testposition bei Anregung mit Schwingungserreger.

Schwingungsmessung bei akustischer Anregung

Anschließend wurde die mechanische Anregung durch einen Lautsprecher als Primärschallquelle ersetzt (siehe Abb. 3). Da dem von der schwingenden Struktur abgestrahlten Schalldruck an den Mikrofonpositionen nun der Primärschall sowie der reflektierte Schall überlagert sind, wird das Ergebnis der Gradientenmethode verfälscht, und zwar besonders in den Frequenzbereichen außerhalb der Resonanzen der Struktur, in denen wenig bis keine Schallabstrahlung stattfindet (siehe Abb. 3 oben). Jedoch lässt sich das Resultat signifikant verbessern, indem der Schalldruck mit Hilfe einer Referenzmessung an einer schallharten Wand korrigiert wird (siehe Abb. 3 unten).

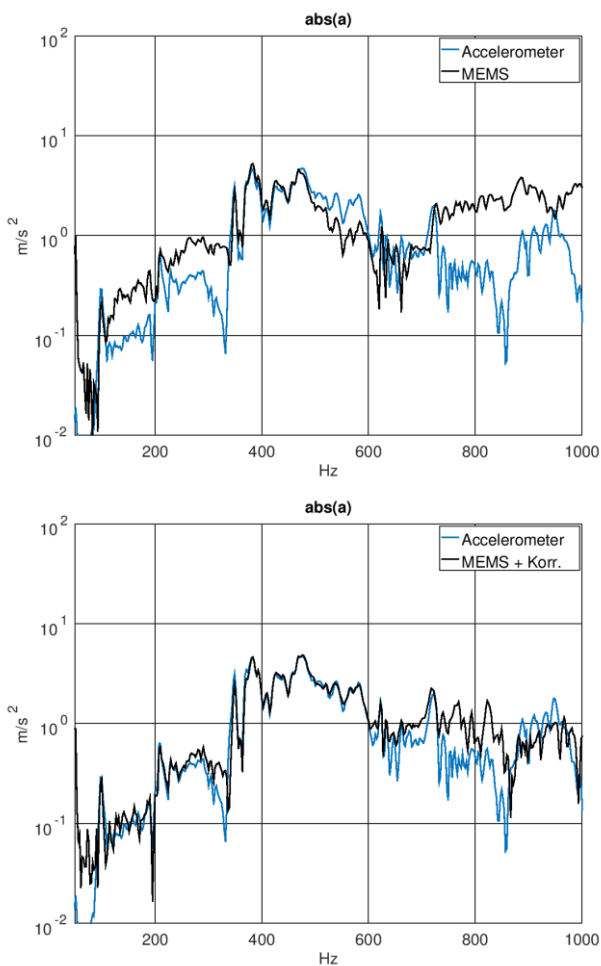


Abbildung 3: Vergleich der mit Accelerometer und MEMS-Gradientenmethode bestimmten Normalbeschleunigung des Panels an einer Testposition bei Anregung mit frontseitigem Lautsprecher. Oben: unkorrigiert; unten: mit Primärschall-Korrektur.

Weitere Erkenntnisse des Vorversuchs:

- Die Schwingungsformen der Struktur sind mit der Gradientenmethode auch bei akustischer Anregung zu reproduzieren.
- Die Schwingungsamplituden stimmen nur in den Resonanzbereichen überein, außerhalb der Resonanzen verschlechtert der Primärschall der Anregung das Ergebnis.

- Die Ergebnisse sind umso besser, je genauer die Amplituden- und Phasenfrequenzgänge des jeweiligen Mikrofonpaars übereinstimmen.
- Eine nachträgliche Kalibrierung kann das Ergebnis zwar verbessern, aber nicht in dem Maß, wie eine Vorauswahl der Mikrofone es könnte.

Schwingungsmessung am Rumpfdemonstrator

Für den Test der Gradientenmethode am Acoustic Flight LAB wurde die Flugzeugstruktur zunächst mit einem Schwingungserreger mit weißem Rauschen angeregt. In einer ca. 2m breiten, den Viertelumfang der Rumpftonne umfassenden Messfläche (auf der dem Lautsprecherarray abgewandten Seite) wurden die Strukturschwingungen an 8 x 29 Positionen jeweils mit Beschleunigungssensoren und MEMS-Mikrofonpaaren kartiert (siehe Abb. 4).

Wie beim Vorversuch stimmten die gemessenen Schwingungsformen qualitativ und quantitativ sehr gut überein. Abb. 5 zeigt exemplarisch einen Vergleich für $f = 270$ Hz; das FDAC (Frequency Domain Assurance Criterion) liefert für die entsprechenden Schwingungsvektoren den Wert 0,85.



Abbildung 4: Acoustic Flight LAB Demonstrator im reflexionsarmen Raum des ZAL TechCenter mit Sensorik und Lautsprecher-Array.

Anschließend wurde der Test mit akustischer Anregung durch das Lautsprecher-Array wiederholt. Auch hier konnten die Erkenntnisse des Vorversuchs bestätigt werden: die Schwingungsformen konnten gut reproduziert werden, die Amplituden in den (auch örtlichen) Resonanzbereichen stimmen ebenfalls gut überein. Außerhalb dieser sinkt der Signal-Rausch-Abstand, was sich in einem geringeren Dynamikbereich des Ergebnisses äußert. Abb. 6 verdeutlicht dies, wieder für 270 Hz; die Korrelation ist aber mit einem FDAC-Wert von 0,80 immer noch gut.

Eine Primärschall-Korrektur wie beim Panel-Test konnte hier noch nicht durchgeführt werden, diese könnte das Ergebnis jedoch weiter verbessern. Eine Vorauswahl ideal abgeglicherer Mikrofonpaare wird sich ebenfalls positiv auswirken; zu diesem Zweck wurde ein Kalibrator für MEMS-Mikrofone konstruiert.

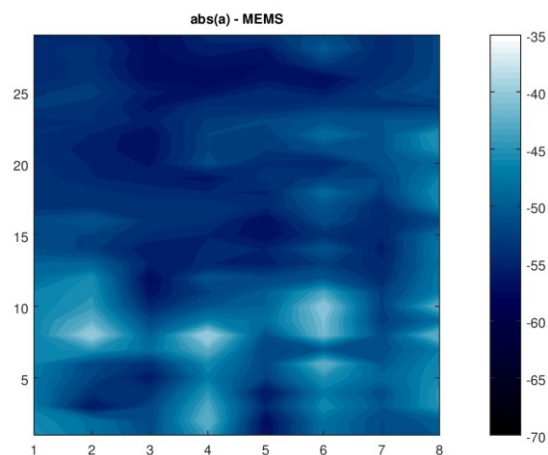
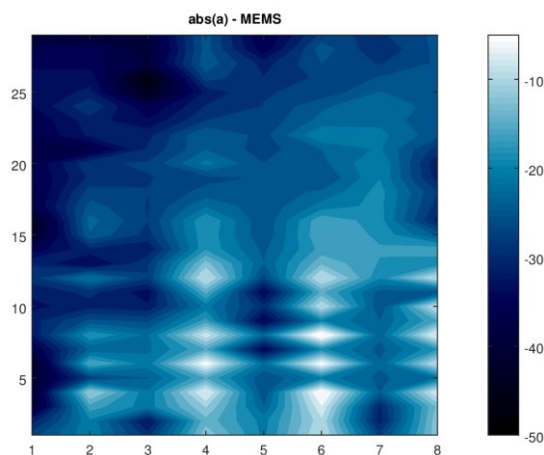
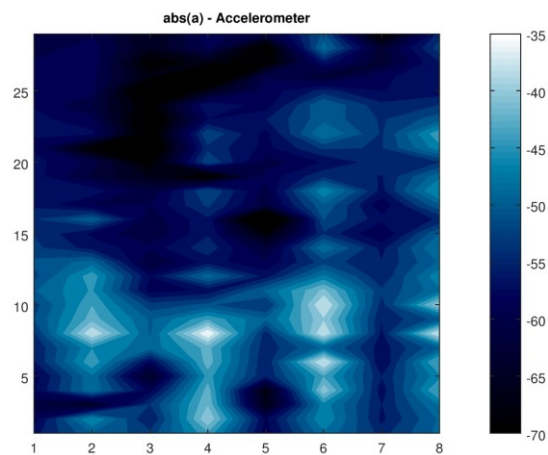
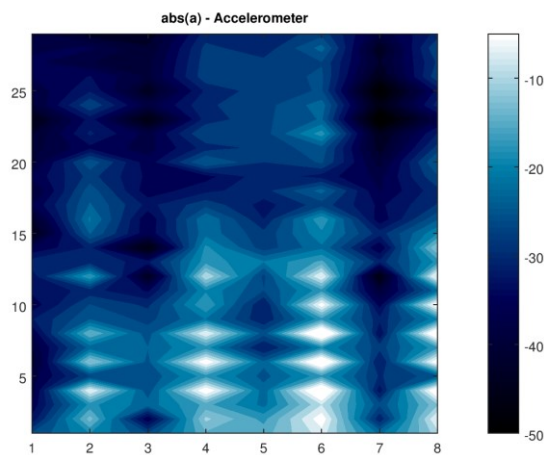


Abbildung 5: Amplitude der Normalbeschleunigung bei $f = 270$ Hz in dB, kartiert mit Beschleunigungssensoren (oben) und MEMS-Mikrofonen (unten) bei Anregung mit Schwingungserreger.

Abbildung 6: Amplitude der Normalbeschleunigung bei $f = 270$ Hz in dB, kartiert mit Beschleunigungssensoren (oben) und MEMS-Mikrofonen (unten) bei Anregung mit Lautsprechern.

Zusammenfassung und Ausblick

Mit geeigneten MEMS-Mikrofon-Paaren lassen sich vibrations- und schallinduzierte Schwingungen an einer Flugzeugstruktur effizient und berührungslos messen, auch im direkten Schallfeld der Anregung. Der Fehler bezüglich Referenzmessungen mit Beschleunigungssensoren liegt im Bereich von Vergleichsmessungen mit einer kommerziellen p-u-Sonde (Microflown). Mit Hilfe eines Korrekturverfahrens für den Primärschall lassen sich die Ergebnisse weiter verbessern.

In einer anstehenden Messkampagne soll dieses Korrekturverfahren auch auf das Lautsprecher-Array am Acoustic Flight LAB angewendet werden. Weiterhin wird das MEMS-Sensorarray erweitert, so dass die ganze Länge des Rumpfdemonstrators (ca. 8m) kartiert wird. Zu diesem Zweck wurde bereits eine Prototyp-Platine mit integriertem Verstärker entwickelt, der die Messsignale auf Line-Pegel anhebt. Auf diese Weise kann ein teures Multikanal-Messfrontend (> 70 Kanäle) umgangen und auf ein Standard-Audiointerface zurückgegriffen werden.

Literatur

- [1] M. Wandel, H. Scheel: Design Requirements of Acoustic Flight LAB Platform. Proceedings of Internoise 2016.
- [2] H.-E. de Bree et al: The Microflown. A novel device measuring acoustical flows. Sensors and Actuators: A, Physical, volume SNA054/1-3, pp 552-557, 1996.
- [3] H.-E. De Bree, V. B. Svetovoy, R. Raangs, R. Visser: The very near field. Theory, simulations and measurements of sound pressure and particle velocity in the very near field. In 11th ICSV, 2004.
- [4] D. Sadra, T. Kletschkowski: Contact-free Vibration Measurements with Particle Velocity Probes – Part II: Experimental Investigations. Tagungsband DAGA 2014.
- [5] M. Weber, K. Kochan: Entwicklung eines robusten und reduzierten Verfahrens zur Messung der Einkopplung des Luftschall-Nahfelds in eine Flugzeugstruktur. Tagungsband DAGA 2017.