

Lärm aktiv reduzieren – simulierte Akustik im Flugzeugbau

Fabrice Teuma, Dr. Thomas Kletschkowski, Prof. Delf Sachau
Helmut Schmidt Universität Hamburg, Institut für Mechanik



Im Flugzeugbau haben nicht nur die Sicherheitsaspekte hohe Priorität, sondern auch der Flugkomfort. An erster Stelle steht hier die Lärmbelastung in der Kabine. An einer Hamburger Universität entwickelt eine Arbeitsgruppe mit einer Simulationssoftware ein Verfahren, mit dem Geräusche reduziert werden können. Mit dem Programm konnten die erwartete Schallfeldverteilung und die akustischen Eigenschaften der Kabine numerisch analysiert und die Ergebnisse verständlich dargestellt werden. Auf dieser Basis kann eine Flugzeugkabine mit passivem und auch aktivem Lärmschutz entworfen werden. Der Einsatz der akustischen Simulation reduziert den Zeit- und Kostenaufwand erheblich.

Ohne Lärmschutz sind die Kabinen von Kleinflugzeugen besonders laut. In der Kabine eines typischen Very Light Jets (VLJ) kann eine Lärmbelastung von bis zu 91,4 dB im Reiseflug gemessen werden. Im Vergleich dazu, beträgt das Gesamtgeräusch von vorschriftsmäßig ausgerüsteten Fahrzeugen – bei einer Vorbeifahrt mit 50 km/h – in einer seitlichen Entfernung von 7,5 m neben der Fahrspurmitte circa 71

dB(A) bei Personenwagen beziehungsweise etwa 82 dB(A) bei Lastwagen. Passive Methoden zur Lärmreduzierung durch absorbierende Materialien eignen sich im Bereich niedriger Frequenzen ($f < 500$ Hz) wegen ihres Volumens und ihres Gewichts nicht als Kabinenverkleidung.

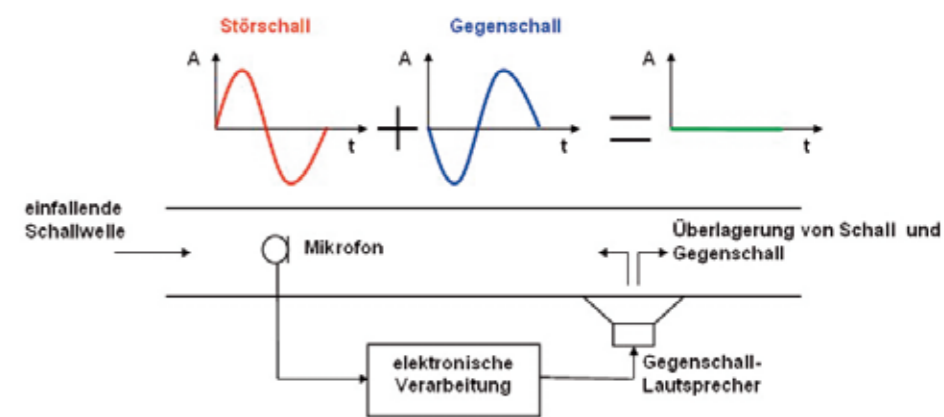
Als Alternative bietet sich im Bereich von tiefen Frequenzen ein aktiv erzeugter Gegenschall an, der

amplitudengleich, aber um 180 Grad zum primären Schallfeld verschoben ist. Der erzeugte Gegenschall interferiert mit der primären Störung und löscht sie auf diese Weise aus. Diese Methode wird Active Noise Control (ANC) genannt (siehe Abbildung 1). Der Regelungserfolg eines ANC-Systems hängt nicht nur von der Qualität der verwendeten Regelalgorithmen ab, sondern auch von der Platzierung der Aktuatoren (Lautsprecher)

und Sensoren (Mikrofone). Das Projekt Audio Interior für Kleinflugzeuge (AIK) wird im Rahmen des zweiten Hamburger Luftfahrtforschungsprogramms bearbeitet. Das Team der Helmut Schmidt Universität Hamburg entwickelt in Partnerschaft mit der Innovint Aircraft Interior GmbH ein kombiniertes ANC- und Audiosystem für Kleinflugzeuge. Das System soll eine hohe Audio Qualität liefern und zugleich unerwünschte Geräusche in der Kabine beseitigen. Mit dem Simulationsprogramm Comsol Multiphysics werden die optimalen Positionen von Lautsprechern und Mikrofonen, sowie die für die ANC-Algorithmen benötigten Übertragungsfunktionen berechnet.

CAD-Modellierung einer Flugzeugkabine

Von der ersten Idee bis zum fertigen Prototyp werden im Laufe des Entwicklungsprozesses verschiedene CAD-Modelle erstellt und verbessert. Die aus der akustischen Simulation der Flugkabine gewonnenen Informationen dienen als Basis zur Konstruktion eines bestimmten Modells. Die Eigenfrequenzen und die zugehörigen Eigenschwingungsformen (Moden) im betrachteten



Die Abbildung 1 zeigt das Grundprinzip einer aktiven Schallreduzierung.

Frequenzbereich sind hierbei von besonderem Interesse. Zur Analyse wurde die Finite Elemente Software Comsol Multiphysics verwendet. Diese ermöglicht eine flexible Nutzeroberfläche, den Datenaustausch mit MATLAB, die Verwendung eines Akustik-Modules, die geometrische Modellierung in 1D, 2D und 3D und den Import von Geometriedaten.

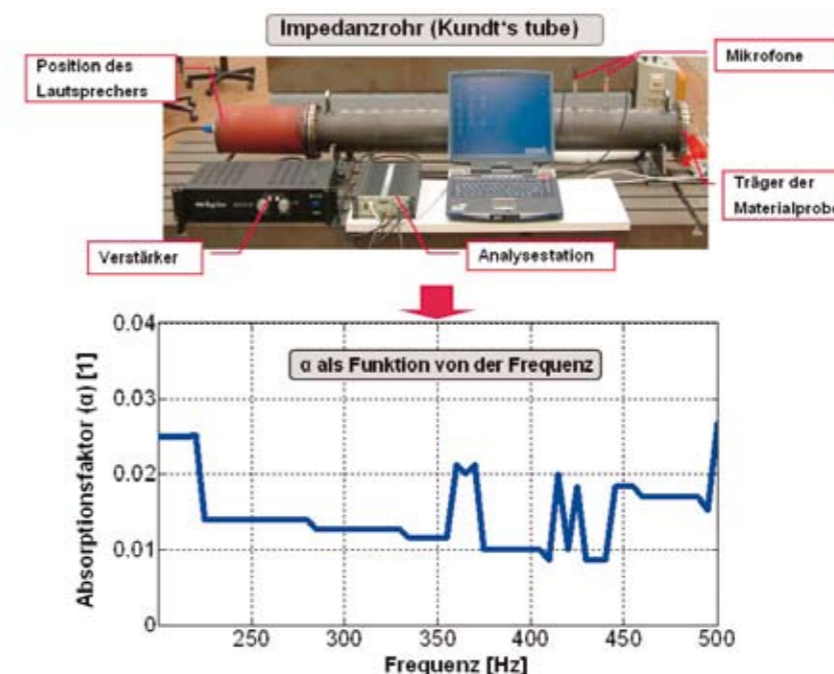
Die Modellgeometrie zeigt – vereinfacht dargestellt – den Luftbereich im Flugzeuginnenraum. Dabei wurden Details vernachlässigt, die das akustische Verhalten des Flugzeuginnenraums nicht wesentlich beeinflussen. Das sind zum Beispiel

kleine künstlerische Verzerrungen zur Verbesserung der optischen Erscheinung.

Für die Vernetzung wurden Tetraeder-Elemente und quadratische Lagrange-Ansatzfunktionen verwendet. Das vorliegende Modell umfasst 60935 Elemente und 92062 Freiheitsgrade. Für die kürzeste betrachtete Wellenlänge (bei 500 Hz) stellt diese Konfiguration mindestens vier Elemente pro Wellenlänge sicher. Dies erfüllt die Forderung für die Genauigkeit der Berechnung mit finiten Elementen.

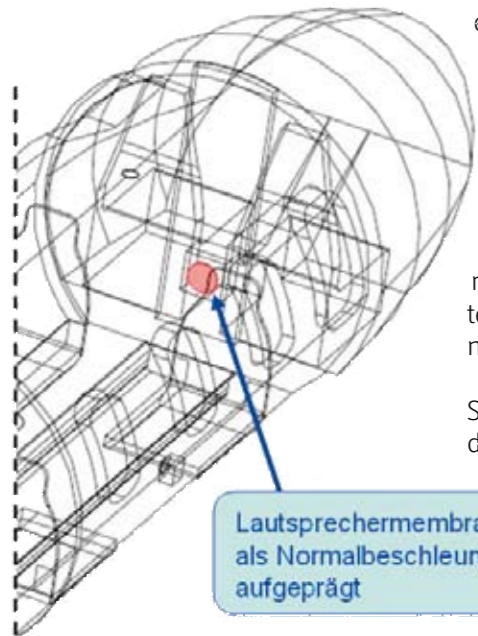
Numerische Analyse von erzwungenen Schwingungen

Die Aussagekraft der numerischen Lösung hängt nicht nur von der Realitäts-Treue des CAD-Modells ab (es darf keinen großen Volumenunterschied zwischen dem Modell und der realen Kabine geben), sondern auch von den Randbedingungen sowie von der Modelldiskretisierung. Der Kabineninnenraum wird mit schallabsorbierenden Materialien wie Teppichböden und Ledersitzen ausgekleidet. Deren Absorptionsvermögen kann aus einer Materialprobe mit Hilfe eines Impedanzrohrs ermittelt und als Impedanzrandbedingung für die zugehörigen Modellränder definiert werden. In Abbildung 2 ist der Aufbau für die Messung des Absorptionsfaktors einer Probe aus Leder zu sehen. Das Ergebnis für ein Material wird als Funktion der Frequenz dargestellt.



Bei der Ermittlung des Absorptionsfaktors wurde eine Probe aus Leder untersucht und das Ergebnis als Funktion der Frequenz dargestellt.

Die Position des Lautsprechers zur Ansteuerung des primären Schallfeldes.



Lautsprechermembran wird als Normalbeschleunigung aufgebracht

Aufgrund von Vereinfachungen bei der Festlegung der Impedanzrandbedingungen und der Vernachlässigung einiger dämpfender Kabineneinbauten, kann eine zusätzliche Dämpfung in Form einer komplexen Wellenzahl zur Korrektur benötigt werden. Dafür wurden im realen Mockup (Holzmodell der Flugzeugkabine) die Frequenzantworten für 232 Messpositionen auf der Kopfebene der sitzenden Passagiere gemessen. Die Frequenzantwort beschreibt den Effektivwert des Schalldruckes infolge einer Erregung des Kabineninnenraums durch die Ansteuerung eines Laut-

sprechers. Die Frequenzantwort bei einer Frequenz f ist das Verhältnis zwischen dem Druck, gemessen an einem Mikrofon, und der Beschleunigung der Lautsprechermembran. Die Position des Lautsprechers wird in Abbildung 3 dargestellt. Durch Variation der Dämpfungszahl wurde das entsprechende FE-Modell solange justiert, bis der berechnete Mittelwert mit dem gemessenen Mittelwert übereinstimmte. Die Dämpfungszahl wurde mit einer Genauigkeit von 10⁻³ ermittelt.

Das FE-Modell darf erst für die Simulation verwendet werden, nachdem es validiert wurde. Eine Prüfung kann durch den Vergleich der numerischen und der gemessenen Frequenzantworten erfolgen. Abbildung 4 zeigt den Vergleich bei einer

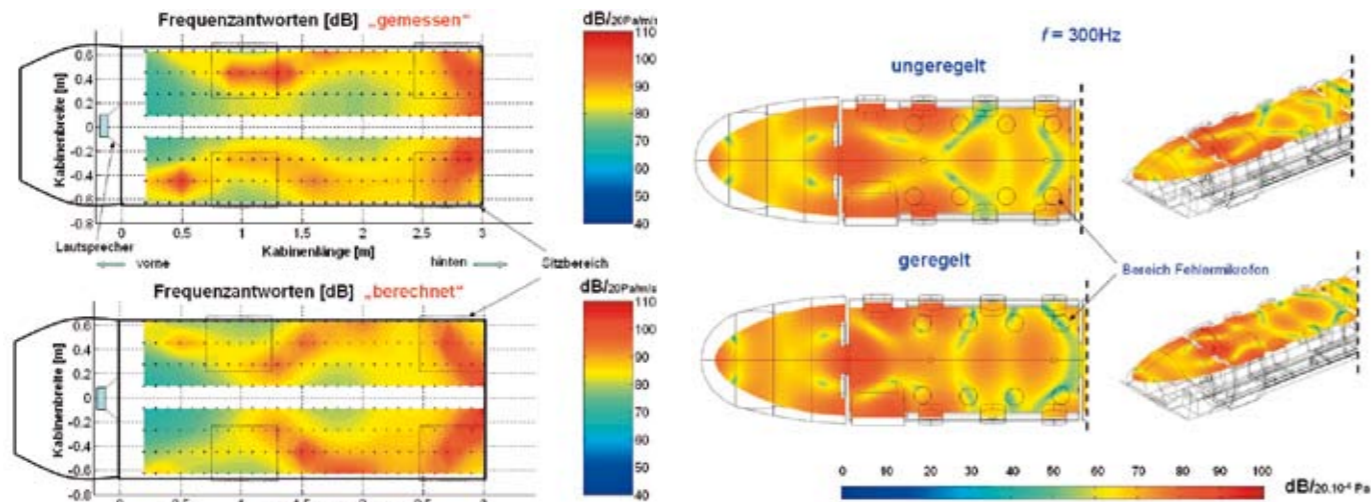
Frequenz von 300 Hz. Auf dieser Ebene ($z = 1$ m) stimmen die Schalldruckverteilung im FE-Modell und im Mockup qualitativ überein. Die mittlere Abweichung beträgt 7,6 dB (bezogen auf 20 Pa/(m/s²)). Die geringste Abweichung liegt bei 0,07 dB, die größte bei 30,9 dB. Die Häufigkeitsverteilung zeigt, dass ca. 51 % der Messpunkte eine Abweichung unter 5 dB aufweisen. Nur 5 % der Messpunkte weichen mehr als 20 dB ab. Mögliche Erklärungen für die Abweichungen zwischen Modell und Mockup sind unter anderem Messfehler und die Vernachlässigung einiger Kabineneinbauten bei der

CAD-Modellierung. Das FE-Modell kann nach dieser Untersuchung als validiert angesehen werden.

Das FE-Modell wird genutzt, um den Regelungserfolg für eine bestimmte Konfiguration von Lautsprechern und Mikrofonen abzuschätzen und so die beste Positionierung von Aktuatoren und Sensoren für die ANC-Regelung zu finden. Dafür wurden neun Lautsprecher und acht Mikrofone in das Kabinenmodell integriert. Die Lautsprecher wurden als Flächenstrahler modelliert, denen eine konstante Beschleunigung zugewiesen wurde. Die Mikrofone werden als Messpunkte im FE-Modell betrachtet. Abbildung 5 zeigt den hinteren Kabinenbereich mit Lautsprechern und Mikrofonen, in Abbildung 5 sind diese gekennzeichnet.

Zunächst wurde die Frequenz $f = 300$ Hz betrachtet. Der Lautsprecher zur Ansteuerung des Primärschallfeldes wurde mit einer konstanten Beschleunigung von $q_0 = 100$ m/s² angesteuert. Nacheinander folgten die Lautsprecher LS1-8, um deren Übertragungszahlen zu den Fehlermikrofonen MIK1-8 zu ermitteln. Daraus ergab sich eine Übertragungsmatrix Z . Gesucht wird ein Satz von Beschleunigungen $q_{opt} = [q_1, \dots, q_8]$ so, dass die beiden folgenden Bedingungen erfüllt werden:

- Bedingung 1: maximale Schallreduzierung an den Fehler-



Numerischer Vergleich zwischen dem geregelten und ungeregelten Schallfeld.

Numerische und gemessene Frequenzantworten bei $f = 300$ Hz

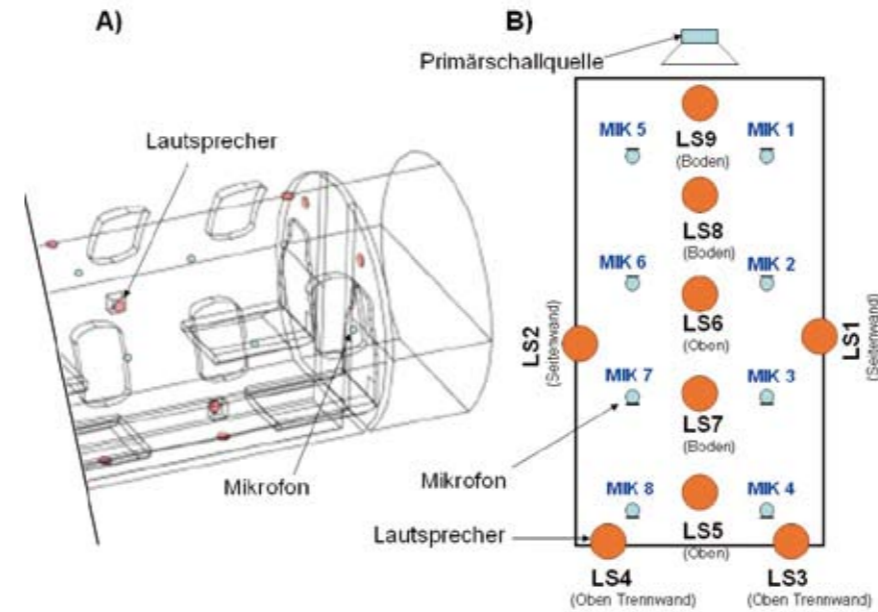
Zusammenfassung

Die akustischen Eigenschaften einer Flugzeugkabine lassen sich nur mit numerischen Simulationsverfahren sinnvoll beschreiben, denn experimentelle Untersuchungen sind immer mit einem sehr hohen zeitlichen und finanziellen Aufwand verbunden. In diesem Beitrag wurde ein typischer Ansatz zur numerischen Simulation der Kabinenakustik von Very Light Jets vorgestellt. Es wurde gezeigt, wie ein FE-Modell einer Flugzeugkabine justiert werden kann, damit deren Eigenschaften mit denen des realen zugehörigen Mockup übereinstimmen. Für eine Frequenz wurde der Regelungserfolg einer Konfiguration von Lautsprechern und Mikrofonen numerisch mit dem Programm Comsol Multiphysics abgeschätzt. So kann man die Position der Lautsprecher optimal anpassen und die Lärmbelastung auf diese Weise reduzieren.

Simulation von physikalischen Prozessen

Comsol Multiphysics ist ein wissenschaftliches Softwarepaket für die Simulation von physikalischen Prozessen. Seine besondere Stärke ist die Multiphysik: Physikalische Eigenschaften und ihre Wechselwirkungen können miteinander gekoppelt und gemeinsam in einem Modell simuliert werden. Ein weiteres Produkt aus der Comsol Produktreihe ist Comsol Script, eine interaktive Skriptsprache, die allein als mathematische Plattform eingesetzt oder innerhalb von Comsol Multiphysics betrieben werden kann, um beispielsweise Modellierungen und Parameterstudien zu automatisieren oder eigene Nutzeroberflächen zu erstellen. Die Software ist erhältlich für Windows, Linux, Solaris und für Mac OS X. Weitere Informationen sind unter www.comsol.de abrufbar.

Comsol Multiphysics GmbH, Göttingen, Tel. 0551/99721-0, www.comsol.de



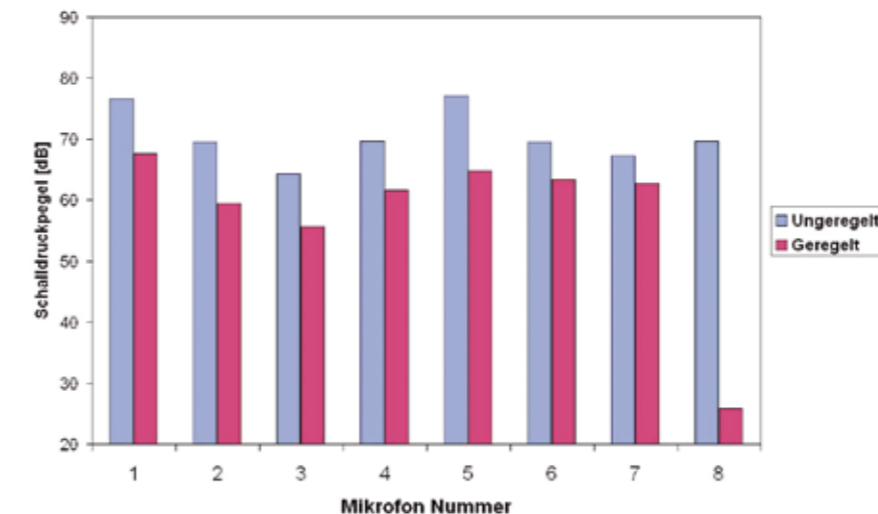
Die Abbildung zeigt die Positionierung von Lautsprechern und Mikrofonen in der Kabine.

mikrofonen. Mathematisch ausgedrückt bedeutet dies: $\|(\text{pprim}-Zq_{opt})\|_2 \text{ Min.}$

- Bedingung 2: Es darf in der Kopfebene in der gesamten Kabine nicht lauter werden.

Die beiden Bedingungen werden in einer kombinierten Optimierungsfunktion erfasst, wobei Bedingung 1 mit einer deutlich größeren Gewichtung berücksichtigt wird. Die optimale Ansteuerung q_{opt} entspricht dem globalen Minimum der Funktion. Das Schallfeld in der Kopfebene der Passagiere mit und ohne Regelung ist in Abbildung 6 darge-

stellt. Die Mikrofonpositionen sind durch Kreise gekennzeichnet. Das Schallfeld wurde so verändert, dass der Schalldruckpegel an den Fehler-Mikrofonen gesenkt wurde. Die räumliche Ausprägung des Schallfeldes in der Kopfebene wurde durch die Regelung nur leicht verändert. Aus dem Diagramm in Abbildung 7 kann man den Regelungserfolg an den Fehlermikrofonen ablesen, an denen eine durchschnittliche Schallreduzierung von 12,8 dB erreicht werden konnte. Aufgrund dieser guten Ergebnisse lohnt es sich, den Versuch in die Praxis umzusetzen.



Deutliches Ergebnis: Regelungserfolg bei den Fehlermikrofonen