

# Berücksichtigung unsicherer Eingangsparameter bei der vibro-akustischen FE-Berechnung von Flugzeugkabinenkomponenten

Stephan Lippert, Otto von Estorff

Institut für Modellierung und Berechnung, Technische Universität Hamburg-Harburg,  
Denickestr. 17, 21073 Hamburg, Deutschland, Email: s.lippert@tuhh.de

## Einleitung

Viele Fragestellungen in der Akustik werden heute mit Hilfe von Diskretisierungsmethoden, wie beispielsweise der Finite-Elemente-Methode (FEM) oder der Boundary-Elemente-Methode (BEM), gelöst. Insbesondere die stetige Weiterentwicklung der Computertechnologie erlaubt dabei die Verwendung immer feinerer und vermeintlich genauerer Modelle. Vielfach unberücksichtigt bleiben dabei jedoch Ungenauigkeiten, die durch die Verwendung unsicherer oder streuender Eingangsdaten entstehen und teilweise zu erheblichen Abweichungen zwischen vorhergesagtem und realem Bauteilverhalten führen. Ein häufiger Grund für ungenaue Eingangsdaten ist die produktionsbedingte Streuung beispielsweise der Werkstoffparameter oder der Bauteilgeometrie. Zusätzlich stehen während der Entwicklung neuer Bauteile oft keine exakten Angaben zu Geometrie und Werkstoffverhalten zur Verfügung.

In dem vorliegenden Beitrag wird beispielhaft an einem Honeycomb-Panel der Flugzeuginnenraumverkleidung gezeigt, wie trotz schwankender Eingangsgrößen das Schalldämmmaß des Bauteils zuverlässig bestimmt werden kann. Hierfür wurde ein gekoppeltes FEM/FEM-Modell des Panels und einer Empfangskavität in MSC.NASTRAN erzeugt und die mit Unsicherheiten behafteten Eingangsparameter definiert (E-Modul der Deckschicht, Wabenkerndicke, Lackschichtdicke und Dämpfung). Aufgrund der Anzahl der Parameter und der hohen Rechenzeit des Modells ist eine Auswertung mit der weitverbreiteten stochastischen Monte-Carlo-Methode nur noch schwer möglich. Stattdessen wurde die auf der Fuzzy-Arithmetik basierende Transformationsmethode verwendet, um Aussagen über die Streuung des Schalldämmmaßes des Bauteils und die Sensitivitäten der einzelnen Parameter zu erhalten.

## Grundlagen der Transformationsmethode

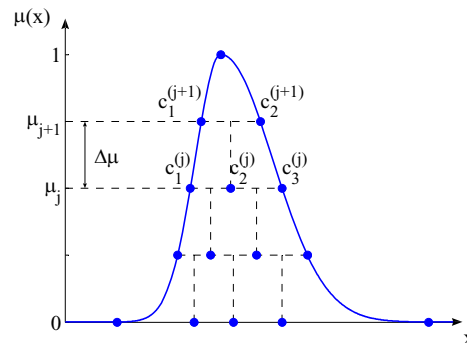
Bereits Mitte der Sechzigerjahre entwickelte ZADEH die *Theorie der unscharfen Mengen (fuzzy sets)* [1], die den klassischen Mengenbegriff ( $x \in U$ ,  $x \notin U$ ) um fließende Zwischenstufen erweitert. Die Zugehörigkeit eines Elementes zu einer Menge wird dabei durch einen *Zugehörigkeitsgrad*  $\mu$  definiert, der Werte zwischen 0 und 1 annehmen kann.

Die Theorie der unscharfen Mengen wurde anfangs vor allem in der Regelungstechnik genutzt, um z.B. linguistische Beschreibungen oder nur teilweise bekannte Systemzustände mathematisch berücksichtigen zu können. Aufgrund ihrer Eigenschaft, nicht exakt definierte Zustände abbilden zu können, werden seit einigen Jahren *unscharfe Zahlen (Fuz-*

*zy-Zahlen)* vermehrt auch zur Beschreibung von Parameterunsicherheiten in Simulationsmodellen verwendet.

Zum Rechnen mit Fuzzy-Zahlen existieren mehrere verschiedene Ansätze, wie beispielsweise die *L-R fuzzy numbers* [2] oder die  *$\alpha$ -cut strategy* [3]. In der Praxis treten jedoch häufig erhebliche Einschränkungen der Anwendbarkeit, wie künstliche Unschärfen oder die Inkompatibilität mit bestehenden Berechnungsprogrammen und Modellen, auf.

Ein möglicher Ansatz, um die Fuzzy-Theorie in eine bestehende Berechnungsumgebung zu integrieren, stellt die auf der Fuzzy-Arithmetik basierende *Transformationsmethode* nach HANSS [4] dar. Die Fuzzy-Zahlen werden dazu, wie bei der  $\alpha$ -cut strategy, in einzelne Zugehörigkeitsniveaus zerlegt. Anstatt diese mit Hilfe der Intervall-Arithmetik zu berechnen, was zu den bereits genannten Einschränkungen führen kann, werden die Zugehörigkeitsniveaus entsprechend einer festen Systematik weiter in einzelne Zahlen zerlegt (Bild 1). Hierdurch wird das unscharfe Problem auf einzelne deterministische Berechnungen zurückgeführt, die sich mit bestehenden Programmen und Modellen lösen lassen.



**Bild 1:** Zerlegung einer Fuzzy-Zahl entsprechend der Transformationsmethode: Zugehörigkeitsniveau  $j$  wird in die reellen Zahlen  $c_1^{(j)}$ ,  $c_2^{(j)}$  und  $c_3^{(j)}$  zerlegt.

## Gekoppeltes FE-Modell

Um die Anwendbarkeit der Transformationsmethode für die Berechnung der Flugzeuginnenraumverkleidung zu untersuchen, wurde ein empirisches Modell eines typischen Deckenpanels erzeugt (Bild 2). Das ebene, 1100 mm x 960 mm große und 1.5 kg schwere Panel besteht aus einem 1/8-inch-Aramidwabenkern, der im Randbereich gestaucht ausgeführt ist (*crushed-core-technology*). Auf der Vorder- und Rückseite sind jeweils eine einlagige GFK-Deckschicht und verschiedene Verstärkungslagen aufgebracht. Das Panel ist auf der Vorderseite lackiert und mit brandhemmender Spachtelmasse beschichtet. Weitere Details können den Tabellen 1 und 2 entnommen werden.

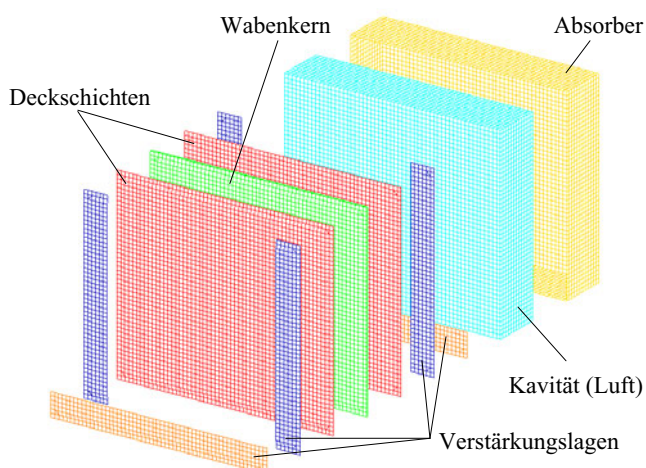
**Tabelle 1:** Parameter des Wabenkerns

Dicke (crushed / uncrushed)	10 / 15 mm
Dichte	29 kg/m <sup>3</sup>
Elastizitätsmodul	60 MPa
Schubmodul L- / W-Rtg	25 / 17 MPa

**Tabelle 2:** Parameter der Deckschichten / Verstärkungen

Lagendicke	0.15 mm
Dichte	2000 kg/m <sup>3</sup>
Elastizitätsmodul	15 GPa
Querkontraktionszahl	0.35

Die Bestimmung des Schalldämmmaßes wurde analog zur Intensitätsmethode nach ISO 15186 vorgenommen. Hierzu wird sendeseitig eine diffuse Schalldruckanregung auf das Panel aufgebracht. Mit den sich einstellenden komplexen Schalldrücken in der Empfangskavität kann die Intensität bestimmt und das Schalldämmmaß berechnet werden.



**Bild 2:** Gekoppeltes FE-Modell (Explosionsdarstellung): Strukturmodell mit angrenzender Empfangskavität und absorbierenden Elementen zur Erzeugung der Freifeldrandbedingung.

## Unsichere Parameter

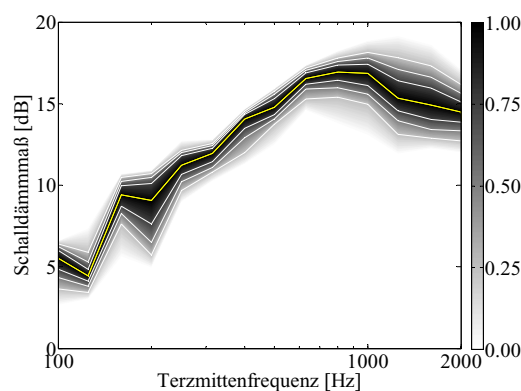
Faserverstärkte Bauteile unterliegen einer vergleichsweise hohen Produktionsstreuung (vgl. [5]). Weiterhin handelt es sich bei den Angaben zu den elastischen Werkstoffparametern aus Dimensionierungsgründen oft um garantierte Mindestwerte der jeweiligen Hersteller. Für das Modell wurden die folgenden Parameter als *quasi-Gauss Fuzzy-Zahlen (gfn)* bzw. *Dreiecks Fuzzy-Zahl (tfn)* definiert:

- Wabenkerndicke: Mittelwert 15 mm  $\pm$  1 mm (gfn)
- E-Modul der Deckschichten und Verstärkungen: Mittelwert 17.25 GPa  $\pm$  2.25 GPa (gfn)
- Beschichtungsdicke: Mittelwert 100  $\mu$ m  $\pm$  25  $\mu$ m (gfn)
- Strukturdämpfung: Mittelwert 3%  $\pm$  2% (tfn)

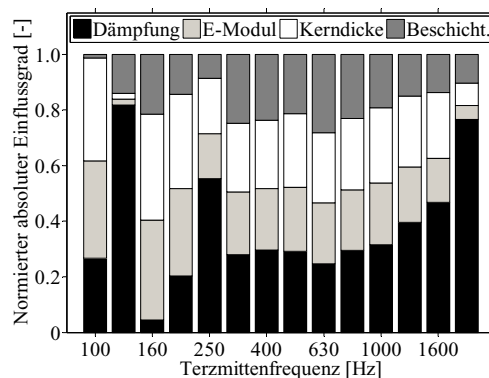
## Ergebnisse

In Bild 3 und 4 sind das unscharfe Schalldämmmaß und die normierten absoluten Einflussfaktoren der einzelnen Para-

meter dabei dargestellt. Die Streubreite des Schalldämmmaßes hängt deutlich von der betrachteten Frequenz ab. Große Abweichungen von bis zu 7.4 dB entstehen insbesondere im tief- und hochfrequenten Bereich, während sich im Bereich des Massegesetzes (Terzen zwischen 315 Hz und 630 Hz) eine nahezu konstante Streubreite von etwa 3 dB ergibt. Die verschiedenen Parameter sind, je nach Terzband, zu sehr unterschiedlichen Anteilen an der Streuung beteiligt. Grundsätzlich lässt sich im Bereich des Massegesetzes eine relativ konstante Verteilung des Einflusses der Parameter beobachten, während die Bedeutung der Strukturdämpfung in der Nähe der Koizidenz immer weiter zunimmt. Im Bereich geringer Modendichte bis zur 250 Hz Terz lassen sich keine allgemeinen Aussagen treffen, hier hängt der jeweilige Einflussgrad stark von der betrachteten Terz ab.



**Bild 3:** Unscharfes Schalldämmmaß des Panels.



**Bild 4:** Einflussfaktoren der einzelnen Parameter.

## Literatur

- [1] Zadeh, L. A.: Fuzzy sets. Information and Control 8 (1965), 338-353
- [2] Dubois, D., Prade, H.: Fuzzy sets and systems - Theory and applications. Academic Press, New York (1980)
- [3] Kaufmann, A., Gupta, M. M.: Introduction to fuzzy arithmetic: Theory and applications. Van Nostrand Reinhold, New York (1985).
- [4] Hanss, M.: Applied fuzzy arithmetic – An introduction with engineering applications. Springer, Berlin (2005)
- [5] Lippert, S., von Estorff, O.: Numerical modelling of sound radiation and transmission loss of a honeycomb panel using measured material properties. Proceedings of the ICSV13, Vienna, Austria (2006)