

Zur Unsicherheit von akustischen Parametern in geometrischen Simulationsverfahren

Michael Rescheleit¹, Stephan Lippert¹, Katrin Hoge¹, Otto von Estorff¹

¹ Institut für Modellierung und Berechnung, TU Hamburg-Harburg, Denickestr. 17, 21073 Hamburg

Email: michael.rescheleit@tu-harburg.de

Einleitung

Die Genauigkeit der Ergebnisse geometrischer Rechenmodelle hängt von der Güte ihrer Eingangsdaten ab. Insbesondere der Absorptionsgrad als wichtigster Parameter hat großen Einfluss auf das Ergebnis. Allerdings ist er oft mit Unsicherheiten behaftet. So ist es z. B. nicht immer möglich, für jedes verwendete Material Messungen durchzuführen. Stattdessen werden Werte ähnlicher Materialien benutzt, ohne die dabei unweigerlich auftretenden Unsicherheiten im Ergebnis sichtbar machen zu können. Aber auch eine Messung ist meist mit zufälligen und systematischen Fehlern behaftet. Nicht zuletzt sorgt auch die Mittelung über alle Einfallrichtungen dafür, dass es bei einer vom idealen Diffusfeld abweichenden Einfallswinkelverteilung zu Ungenauigkeiten kommt.

Im Folgenden soll eine Möglichkeit vorgestellt werden, Unsicherheiten in den Eingangsdaten durch Verwendung von Fuzzy-Zahlen in der Rechnung zu berücksichtigen.

Rechenmodell

Das verwendete Rechenmodell dient zur Berechnung der Schalldruckverteilung in Flugzeugkabinen. Dies ist besonders für VIP-Kabinen von Nutzen, die nicht in Serie gefertigt werden, bei denen gleichzeitig aber hohe Ansprüche an die Kabinenakustik gestellt werden. Um das Schallfeld bereits in der Planungsphase modellieren und beispielsweise die Auswirkungen eines Austauschs von Oberflächenmaterialien vorhersagen zu können, wird ein stochastisches Raytracing-Verfahren verwendet. Besonderes Interesse gilt dabei den Terzbändern von 800 Hz bis 5000 Hz, da in diesem Bereich die Abnahmemessungen vor Auslieferung des Flugzeuges durchgeführt werden.

Abgesehen vom geometrischen Modell beeinflussen dabei im Wesentlichen drei Parameter das Ergebnis: Der Absorptionsgrad α , der Streugrad s und die Dissipationskonstante m . Während die beiden erstgenannten Größen vor allem materialabhängig sind, wird die Dissipationskonstante von den Umgebungsbedingungen, insbesondere der Luftfeuchte, bestimmt. Das hier vorgestellte Verfahren lässt sich auf alle Eingangsgrößen anwenden, auch wenn im Folgenden nur der Absorptionsgrad näher betrachtet wird.

Bestimmung des Absorptionsgrades

Die Absorptionsgrade, die im Flugzeugkabinen-Modell verwendet werden, stammen aus einer Materialdatenbank, deren Einträge aus Messungen im Impedanzrohr nach DIN EN ISO 10534-2 gewonnen wurden. Für den Aufbau einer umfassenden Datenbank bietet das Impe-

danzrohr den Vorteil, dass nur geringe Probengrößen erforderlich sind. Da die für VIP-Kabinen verwendeten Materialien z. T. sehr teuer sind, wären Messreihen im Hallraum sehr kostspielig. Allerdings liegt im Impedanzrohr ein ebenes Schallfeld vor, was nicht der Modellvorstellung eines Diffusfeldes, die dem Raytracing zu Grunde liegt, entspricht.

Unter der Annahme, dass ein lokal wirkendes Material vorliegt, d. h. die Impedanz nicht winkelabhängig ist, kann eine Umrechnung der Messwerte für senkrechten Schalleinfall auf mittlere Absorptionsgrade im Diffusfeld erfolgen. Der diffuse Absorptionsgrad α_{diff} berechnet sich aus der im Impedanzrohr gemessenen normierten Impedanz ζ zu [1]

$$\alpha_{diff} = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \left(1 - \left| \frac{\zeta \cos(\theta) - 1}{\zeta \cos(\theta) + 1} \right|^2 \right) \sin(2\theta) d\theta. \quad (1)$$

Diese Art der Umrechnung wird u. a. auch im Anhang von ISO 10534 vorgeschlagen.

Ein Vergleich mit Messdaten zeigt jedoch, dass die so gewonnenen Werte nicht immer ohne Weiteres als Absorptionsgrade verwendet werden können. In einem kleinen Hallraum (Volumen 39 m³) wurden der Boden mit einem Flugzeugteppich und zwei der vier Wände mit einem Schaumstoff belegt. Ein Vergleich einer Schalldruckpegelmessung mit Simulationsergebnissen zeigt, dass die Absorption in der Rechnung deutlich unterschätzt wird (Abb. 1). Dies liegt daran, dass an den relativ kleinen Einzelflächen Kanteneffekte auftreten, die in der Rechnung nicht berücksichtigt werden.

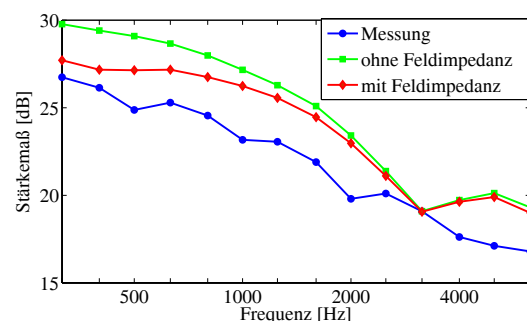


Abbildung 1: Vergleich der Simulationsergebnisse mit und ohne Berücksichtigung von Feldimpedanzen mit Messwerten.

Erhöhen lässt sich die Genauigkeit, indem der Einfluss der Geometrie durch Einführung einer zusätzlichen, nicht materialabhängigen Feldimpedanz Z_f berücksichtigt wird. Diese Feldimpedanz ist sowohl vom Azimutwinkel ϕ als auch vom Polarwinkel θ der Einfallrichtung

abhängig. Der über alle Winkel gemittelte Absorptionsgrad ergibt sich in diesem Fall zu [2]

$$\alpha_{diff} = \frac{4 \operatorname{Re}\{\zeta\}}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{2\pi} \frac{\sin(\theta)}{|Z_f(\theta, \phi) + \zeta|^2} d\phi d\theta. \quad (2)$$

Für die Berechnung der Feldimpedanz sei auf Thomasson [2] verwiesen.

Auf diese Weise ist eine deutliche Reduzierung des Fehlers im tiefen Frequenzbereich möglich (vgl. Abb. 1). Der verbleibende Fehler ist wahrscheinlich hauptsächlich auf die nicht zutreffende Annahme eines lokal wirkenden Materials zurückzuführen.

Weitere Unsicherheiten entstehen z. B. durch Messfehler, lokale Schwankungen der Materialeigenschaften oder fehlende Messwerte, die durch Schätzungen und Vergleich mit anderen Materialien ersetzt werden müssen.

Berücksichtigung von Parameterunsicherheiten

Wenn bekannt ist, dass die Eingangsparameter Unsicherheiten enthalten und es möglich ist, diese zumindest näherungsweise zu quantifizieren, stellt sich die Frage nach einer Möglichkeit zur expliziten Berücksichtigung dieser Unsicherheiten. Die im Folgenden vorgestellte Methode benutzt Fuzzy-Zahlen für eine Beschreibung sowohl der Eingangs- als auch der Ausgangsgrößen.

Herkömmliche Mengen kennen in Bezug auf die Zugehörigkeit eines bestimmten Wertes nur zwei Zustände: Entweder der Wert gehört zu der Menge, oder er gehört ihr nicht an. Bei Fuzzy-Mengen wird die Zugehörigkeit dagegen durch eine Zugehörigkeitsfunktion μ beschrieben, die kontinuierliche Werte zwischen 0 und 1 annehmen kann. Neben die beiden Zustände 0 (keine Zugehörigkeit) und 1 (volle Zugehörigkeit) treten so Bereiche von Werten, die gewissermaßen nur teilweise zur Menge gehören.

Auf diese Weise lassen sich Eingangsparameter als unscharfe Zahlen darstellen. So kann die Unsicherheit in einem Absorptionsgrad z. B. abgebildet werden, indem dem eigentlich erwarteten Absorptionsgrad die Zugehörigkeit 1 zugewiesen wird, während die möglichen Abweichungen nach oben und unten dadurch beschrieben werden, dass die Zugehörigkeitsfunktion nach links und rechts stetig abfällt und somit einen größeren Wertebereich mit einbezieht (s. Abb. 2).

Für die Rechnung wird die Fuzzyzahl diskretisiert, indem nur noch ausgewählte Zugehörigkeitsniveaus betrachtet werden. Für jedes betrachtete Zugehörigkeitsniveau ergibt sich ein Intervall (vgl. Abb. 2). Diese Intervalle werden ebenfalls diskretisiert. Wird der Eingang monoton auf den Ausgang des Rechenmodells abgebildet, reicht eine Diskretisierung durch zwei Punkte (obere/untere Intervallgrenze) aus. Andernfalls müssen weitere Stützstellen eingefügt werden. Mit jedem so entstandenen diskreten Wert wird nun eine Raytracing-Rechnung durchgeführt. So lässt sich für jedes Zu-

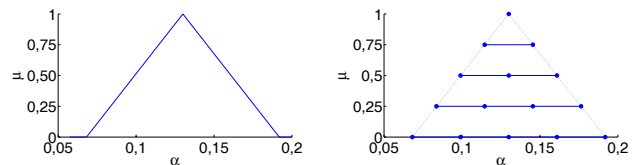


Abbildung 2: Links: Fuzzyzahl. Rechts: Auf den Zugehörigkeitsniveaus 0; 0,25; 0,5; 0,75 und 1 diskretisierte Fuzzy-Zahl mit Stützstellen.

gehörigkeitsniveau am Eingang ein Intervall des entsprechenden Zugehörigkeitsniveaus am Ausgang berechnen, wodurch man wiederum eine Fuzzy-Zahl als Ausgangsgröße erhält. Ein Ergebnis ist beispielhaft in Abb. 3 dargestellt.

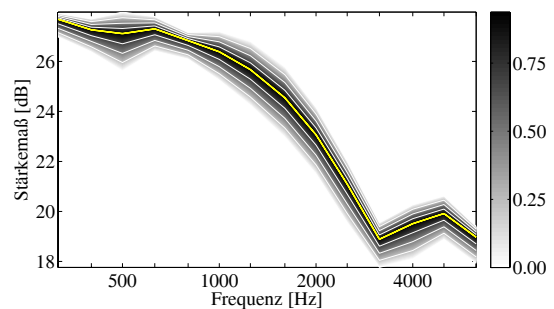


Abbildung 3: Ergebnis einer Rechnung mit Fuzzy-Zahlen. Die Einfärbung gibt das Zugehörigkeitsniveau an.

Um den Rechenaufwand trotz der dafür nötigen wiederholten Rechnungen gering zu halten, wird ein zweistufiges Verfahren angewendet: Bei der ersten Raytracing-Rechnung wird der Verlauf der Strahlen abgespeichert. Für alle weiteren Rechnungen muss der Strahlverlauf nun nicht mehr neu konstruiert werden, sondern die fertig vorliegenden Verläufe werden nur noch mit jeweils anderen Parametern neu ausgewertet. Dies führte in Probe-rechnungen zu einer Verkürzung der Rechenzeit auf weniger als ein Zwanzigstel der Zeit, die für eine vollständige Rechnung mit Strahlkonstruktion benötigt wird.

Zusammenfassung

Die Eingangsparameter geometrischer Rechenverfahren sind oft mit Unsicherheiten behaftet. Diese Unsicherheiten können mit Hilfe von Fuzzy-Zahlen ausgedrückt werden. Das beschriebene Verfahren ermöglicht es, mit wenig Mehraufwand auch das Ergebnis als Fuzzy-Zahl zu berechnen. Dadurch ist eine Aussage über die Unsicherheiten im Ergebnis der Rechnung möglich.

Literatur

- [1] Kuttruff, H.: Room Acoustics. Spon, London, 2000.
- [2] Thomasson, S.-I.: On the Absorption Coefficient. *Acustica* 44 (1980), 265–273