

# Rechenmodell zur Simulation des Akustikkomforts in Flugzeugkabinen

Katrin Hoge, Michael Rescheleit, Otto von Estorff

Institut für Modellierung und Berechnung, TU Hamburg-Harburg, Denickestraße 17, 21073 Hamburg  
E-Mail: k.hoge@tu-harburg.de

## Einleitung

Akustische Eindrücke werden im Vergleich zu visuellen Reizen indirekter wahrgenommen, beeinflussen jedoch das Wohlbefinden des Menschen in hohem Maße. Neben dem Arbeitsschutz, der vor allem einen niedrigen Belastungspegel fordert, stellt eine der Situation angepasste Akustik auch einen wichtigen Komfortfaktor dar.

Mögliche Maßnahmen zur akustischen Optimierung einer Flugzeugkabine sollen aus wirtschaftlichen Gründen möglichst gewichtsneutral realisiert werden. So spielt neben der akustischen Dämmung der Primärstruktur vor allem eine geschickte Auswahl und Platzierung der in der Einrichtung der Kabine verwendeten Materialien eine wichtige Rolle.

In dem vorliegenden Beitrag wird ein Rechenmodell zur Simulation der Kabinenakustik vorgestellt. Das Modell berücksichtigt die Geometrie der Kabinen Oberflächen und deren akustische Eigenschaften. Die Grundlage des Modells ist ein modifiziertes Ray-Tracing-Verfahren.

## Das Rechenmodell im Überblick

Das Rechenmodell kann im Wesentlichen in drei Teile unterteilt werden: das Preprocessing, die Ray-Tracing-Schleife und das Postprocessing.

Im Preprocessor wird die Kabinengeometrie aus einem vrmf Dateiformat eingelesen und die Oberflächeneigenschaften zugewiesen. Hierzu wurde zuvor eine Datenbank mit den Absorptionseigenschaften von in der Kabinenausstattung üblichen Materialien erstellt. (Die abgelegten Absorptionseigenschaften wurden mit Hilfe von Impedanzrohrmessungen gewonnen.) Weiterhin können Lösungsparameter für den Ray-Tracing-Algorithmus, wie z.B. der Frequenzbereich, die Empfänger und das Quellmodell hier eingestellt werden.

Das eigentliche Ray-Tracing beginnt mit dem Aufbau eines BSP-Trees, vgl. [2], in dem sowohl die Geometrie als auch die Quellen und Empfänger eingeordnet sind. Es folgt die Strahlverfolgungsschleife, bei der jeder von der Quelle ausgesandte Strahl auf Schnittpunkte mit der Raumgeometrie und mit den Empfängern überprüft wird. Reflexionen an Wandoberflächen wurden nach Embrechts, vgl. [3], implementiert. Damit können auch diffuse Reflexionen berücksichtigt werden, sofern entsprechende Diffusitätsgrade bereitgestellt werden.

Während des Postprocessings können Ergebnisse exportiert und visuell aufbereitet werden.

## Vergleich mit anderen Berechnungen

Das implementierte Ray-Tracing-Verfahren wird mit Hilfe des 3. PTB Ringvergleichs für akustische Simulationsprogramme verglichen, vgl. [4]. Der Ringvergleich gliedert sich in drei Phasen. Ausgangspunkt sind die Geometriedaten und Messergebnisse eines Tonstudios im PTB.

In einem ersten Schritt wird das Rechenmodell mit den Simulationsergebnissen einer Boundary-Elemente-Methode (BEM) verglichen. Bei dieser Gegenüberstellung wird die Geometrie aus Phase 1 des Ringvergleichs genutzt. Der Schalldruckpegel für das Terzband um 250 Hz wird mit dem Ray-Tracing-Modell in einem Durchlauf und mit einem BEM Programm in diskreten 1 Hz - Schritten (224-280 Hz, insgesamt 57 Einzelrechnungen) simuliert. Die Ergebnisse sind in **Tabelle 1** gegenübergestellt. Die Abweichung beträgt weniger als 1 dB und ist nahezu nicht hörbar.

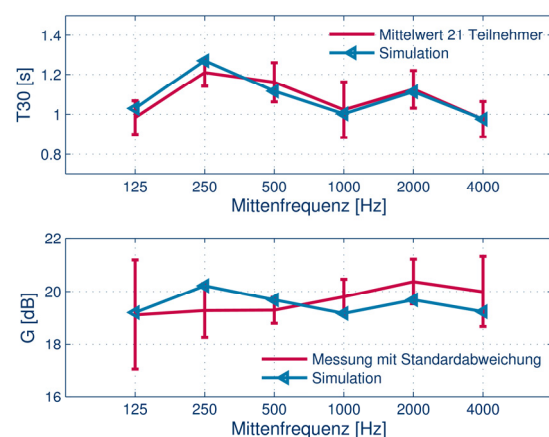
**Tabelle 1:** Vergleich der Ergebnisse von BEM und Raytracing, Terzband um 250 Hz

Verfahren	Schalldruckpegel [dB]	Rechenzeit (Desktop PC)
BEM	91,5	ca. 8 h
Raytracing	90,7	28 s
Abweichung	0,8	

Für einfache Geometrien und vernachlässigbare Welleneffekte kann damit eine recht genaue Akustikrechnung bei, im Vergleich zur BEM; stark verringertem Rechenaufwand durchgeführt werden.

Als nächstes soll das Rechenmodell mit anderen akustischen Simulationsprogrammen verglichen werden. Dazu wird die Phase 2 des Ringvergleichs mit dem Rechenmodell simuliert und die Ergebnisse mit denen der anderen Teilnehmer und bereitgestellten Messergebnissen verglichen.

In **Bild 1** sind zwei Ergebnisse dieses Vergleichs dargestellt. Im oberen Teil wird die vom Rechenmodell simulierte Nachhallzeit T30 mit dem Mittelwert der 21 Teilnehmer verglichen. Darunter wird das vom Rechenmodell simulierte Stärkemaß G den Messergebnissen der PTB gegenübergestellt. In beiden Fällen liegen die simulierten Ergebnisse über den gesamten betrachteten Frequenzbereich innerhalb der Standardabweichung.



**Bild 1:** Ringvergleich, Phase 2: T30 Vergleich mit anderen Teilnehmern, G Vergleich mit Messungen.

## Vergleich von Messung und Rechnung

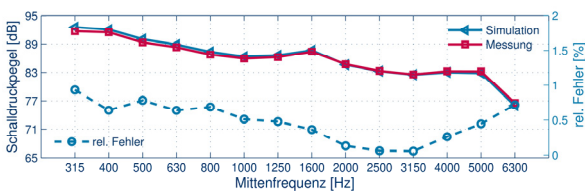
Um das Rechenverfahren zu validieren wurden Vergleichsmessungen im Hallraum (Volumen: 45 m<sup>3</sup>, Oberfläche: 75 m<sup>2</sup>) durchgeführt. Ziel der Messungen war es, zum einen den Einfluss der Eingangsparameter abzuschätzen, zum anderen das Verhalten des Modells bei steigender Komplexität des Aufbaus und der Eingangsdaten zu beobachten.

Es wurden fünf verschiedene Aufbauten im Hallraum untersucht

- Leerer Hallraum [M1]
- Boden bedeckt mit Teppich [M2]
- Zusätzliches Absorptionsmaterial an zwei Wänden [M3]
- Zusätzliches Absorptionsmaterial an allen vier Wänden [M4]
- Zusätzliches Absorptionsmaterial an der Decke [M5]

Bei jeder Messung wurden der Schalldruckpegel und die Nachhallzeit T30 von 315 – 6300 Hz in Terzen bestimmt. Zusätzlich wurden die Absorptionseigenschaften der verwendeten Materialien sowohl im Hallraum als auch im Impedanzrohr bestimmt.

Für die Simulation werden sowohl die Absorptionsgrade aus Impedanzrohrmessungen (Ergebnisse in **Bild 3** gelb dargestellt) als auch die im Messraum bestimmten Absorptionsgrade (blau dargestellt) verwendet. Es werden keine Streugrade zugewiesen, d.h. diffuse Reflexionen werden hier vernachlässigt. Die Quellenergie entspricht dem während der Messung verwendeten Dodekaeder. Es werden 60.000 Strahlen bei einem Konfidenzintervall von  $\pm 0,5$  dB benötigt. Die CPU-Zeit beträgt 17 s (Antwortzeit 5 s).



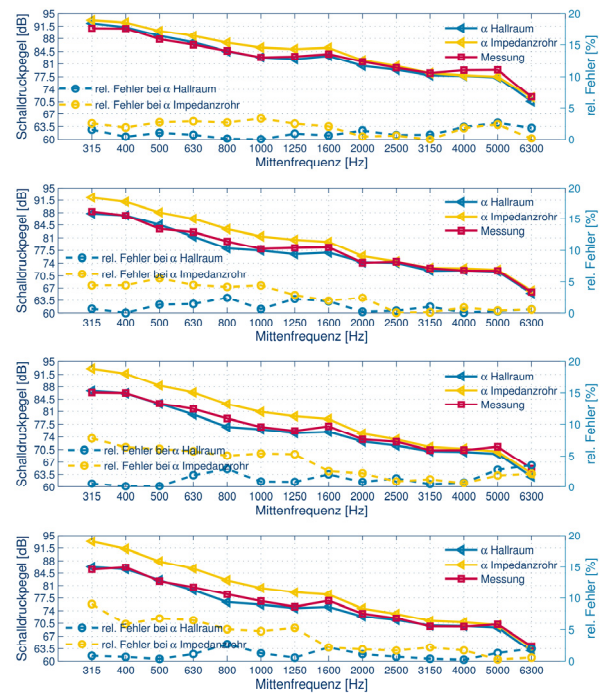
**Bild 2:** Vergleich von Simulation und Messung im leeren Hallraum.

In **Bild 2** sind die Ergebnisse für den leeren Hallraum dargestellt. Hier werden nur die Absorptionseigenschaften des Hallraums verwendet. Es ist über den gesamten Frequenzbereich eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Messung und Simulation festzustellen. Der relative Fehler (gestrichelte Kurve) bleibt für alle Frequenzen unter einem Prozent.

In **Bild 3** sind nacheinander die weiteren vier Messaufbauten, geordnet nach steigender Komplexität, gezeigt. Dargestellt sind wieder der gemessene und simulierte Schalldruckpegel sowie der relative Fehler. Bei diesen Simulationen wird zusätzlich zu den im Hallraum bestimmten Eingangsparametern auch der im Impedanzrohr gemessene Absorptionsgrad verwendet.

Über den gesamten Frequenzbereich ergibt sich erneut eine sehr gute Übereinstimmung von gemessenen und den mit den Eingangsdaten aus dem Hallraum simulierten Schalldruckpegeln. Im Falle der Simulationen mit den Impedanzabsorptionsgraden ist, besonders im tieferen Fre-

quenzbereich und mit steigender Komplexität, ein höherer relativer Fehler festzustellen. Ab 1,6 kHz bleibt der Fehler unter drei Prozent.



**Bild 3:** Vergleich von Simulationen und Messung, von oben nach unten [M2] - [M5].

## Zusammenfassung und Ausblick

Ein Rechenmodell zur Simulation des Akustikkomforts in Flugzeugkabinen konnte mit Hilfe von anderen Simulationsprogrammen (wellentheoretischen und geometrischen) erfolgreich verifiziert werden. Der Vergleich mit Messungen lieferte ebenfalls eine sehr gute Übereinstimmung. Festgestellt werden konnte eine deutliche Abhängigkeit der Simulationsgüte von den Eingangsparametern und der Komplexität des Versuchsaufbaus.

Weitere Messungen sowohl in Flugzeugkabinen als auch im Hallraum sind vorgesehen.

## Literatur

- [1] Rescheleit, M.: Implementierung und Validierung eines Rechenmodells zur Bestimmung des Schalldruckpegels in Flugzeugkabinen, Diplomarbeit, Institut für Modellierung und Berechnung, TU Hamburg-Harburg (2010)
- [2] Schröder, D.; Lentz, T.: Real-Time Processing of Image Sources Using Binary Space Partitioning. JAES, Vol. 54, No. 7/8, 2006, S. 604-619
- [3] Embrechts, J. J.: Broad spectrum diffusion model for room acoustics ray-tracing algorithms. JASA, Vol. 107 No. 4, 2000
- [4] Bork, I.: Simulation and Measurement of Auditorium Acoustics, Proceedings of the Institute of Acoustics, Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig, 2002