

Validierung eines Ray-Tracing-Modells zur Simulation der Akustik 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

Die Auftraggeber von VIP-Flugzeugkabinen stellen besonders hohe Anforderungen an eine gute Akustik. Diese gilt es schon im Entwurfsstadium mit Hilfe von geeigneten Rechenmodellen zu untersuchen. Wichtigste akustische Größe ist dabei der SIL3 Pegel, der den arithmetischen Mittelwert aus 1000 Hz, 2000 Hz und 4000 Hz Oktave bildet. Diese Größe wird für jede VIP-Kabine neu verhandelt und darf später im Flug nicht überschritten werden.

Der Vorteil einer Simulation der akustischen Verhältnisse in der Kabine liegen auf der Hand. Zum einen können die vereinbarten Pegelgrenzen kontrolliert werden, zum anderen ist so eine akustische Optimierung der Kabine, durch Materialauswahl und -anordnung, möglich.

In dem vorliegenden Beitrag wird ein angepasstes Ray-Tracing-Modell für die Simulation des SIL3 in VIP-Flugzeugkabinen anhand mehrerer Messungen validiert. Das Modell berücksichtigt die Geometrie der Kabinen Oberflächen und deren akustische Eigenschaften. Als Schallquelle dient hier jeweils der in der Messung verwendete Lautsprecher (Dodekaeder). Die Messungen beginnen mit idealen Bedingungen für das Modell und nähern sich schrittweise der Flugzeugkabine an.

Rechenmodell und Modellgrundlage

Der Ray-Tracing-Algorithmus beruht auf einem statistischen Ansatz. Ausgehend von einer Quelle im Raum werden eine große Anzahl von der Quelle ausgesendeter Schallteilchen oder Strahlen durch den Raum verfolgt. Jeder Strahl führt dabei einen Teil der Quellenergie mit sich. Trifft ein Strahl auf eine Begrenzungsfläche, so wird er spekulär oder streuend reflektiert und die Energie um den Teil verringert, der an der Wand dissipiert oder transmittiert wird. Eine wichtige Eingangsgröße des Rechenmodells ist daher der Absorptionsgrad der Flächen im untersuchten Raum. Trifft der Strahl eine Empfangsposition, wird die Schallenergie und der Zeitpunkt detektiert. Am Ende kann die Raumimpulsantwort aufgestellt und mit Hilfe dieser nicht nur der SIL3 Pegel, sondern viele verschiedene akustische Parameter berechnet werden.

Das Ray-Tracing-Verfahren gehört zu den geometrischen akustischen Methoden. Ausgehend von der Schallquelle wird eine strahlenförmige Ausbreitung angenommen. Damit sind die Grenzen dieser Modellvorstellung aufgezeigt: Welleneffekte wie Interferenz, Refraktion oder Beugung werden nicht abgebildet. Auf das zu untersuchende Problem bezogen darf sich das Ausbreitungsmedium nicht ändern und die charakteristischen Abmessungen müssen größer sein als die betrachteten Wellenlängen. Eine ausführliche Beschreibung der geometrischen Akustik findet sich in [1].

Validierungsmessungen

Um das implementierte Ray-Tracing-Verfahren für die Berechnung des SIL3 Pegels in Flugzeugkabinen zu validieren, sollen berechnete SIL3 Pegel gemessenen gegenübergestellt werden. In diesem Beitrag werden drei verschiedene Messreihen vorgestellt. Am Anfang wird ein für die Modellvorstellung ideales Szenario gewählt und Messungen in einem leeren Hallraum durchgeführt. Es folgt eine Messung bei der in diesen Raum Trennwände eingefügt werden und so die charakteristischen Abmaße des Raums verkleinert werden. Am Ende steht eine Messung in einer VIP-Flugzeugkabine. Ziel dieser Messreihen ist es, von einer sehr einfach kontrollierbaren Umgebung mit idealen Bedingungen für das Modell ausgehend sich schrittweise der Flugzeugkabine zu nähern. Auf diese Weise kann eine differenzierte Betrachtung möglicher Abweichungen der Simulation zum Messergebnis erreicht werden.

Die Mess- und Simulationsergebnisse für den leeren Hallraum (Volumen: 39 m³, Oberfläche: 71 m²) sind in **Tabelle 1** zusammengefasst (vgl. [3]).

Tabelle 1: Vergleich der SIL3 Pegel aus Messung und Simulation im leeren Hallraum

	Messung SIL3 [dB]	Simulation SIL3 [dB]
Leerer Hallraum	89,7	89,9

Als Eingangsdaten dienen die triangulierte Geometrie des Hallraums, die Schallenergie des verwendeten Dodekaeders und der Absorptionsgrad der Wände, gemessen im selben Raum nach EN ISO 354. Die Abweichung der Simulation beträgt 0,2 dB und liegt im Bereich der Messunsicherheit. Herrschen im zu untersuchenden Raum ideale Bedingungen für das Modell kann der SIL3 Pegel mit hoher Genauigkeit berechnet werden.

Als nächstes wird akustisches Absorptionsmaterial an die Wände des Hallraums angebracht. In vier Schritten wird so die äquivalente Absorptionsfläche des Raumes erhöht.

- Boden bedeckt mit Teppich (Aufbau 1)
- Zusätzliches Absorptionsmaterial an zwei Wänden (Aufbau 2)
- Zusätzliches Absorptionsmaterial an allen vier Wänden (Aufbau 3)
- Zusätzliches Absorptionsmaterial an der Decke (Aufbau 4)

Bei der Simulation wird für das Absorptionsverhalten der Wände einmal ein im Hallraum nach EN ISO 354 ermittelter Absorptionsgrad und einmal der Absorptionsgrad aus einer Impedanzrohrmessung nach EN ISO 10534-2 verwendet.

Die Messung im Impedanzrohr liefert einen Wert für senkrechten, der Absorptionsgrad aus einer Hallraummessung für diffusen Schalleinfall auf die Probe. In **Bild 1** werden die berechneten SIL3 Pegeln den gemessenen gegenübergestellt.

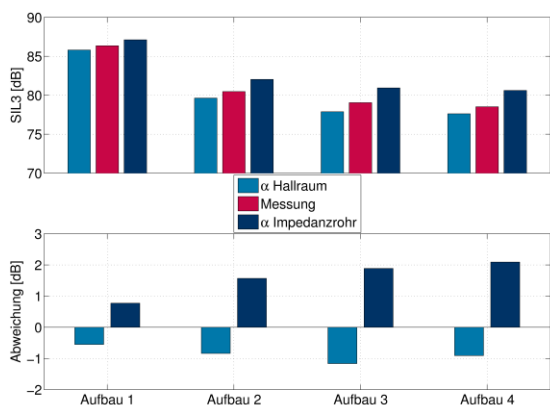


Bild 1: Vergleich der SIL3 Pegel aus Messung und Simulationen mit verschiedenen ermittelten Absorptionsgraden

Die untere Graphik in **Bild 1** zeigt die Abweichungen der beiden Simulationen von den gemessenen SIL3 Pegeln für die komplexer werdenden Messaufbauten. Es ist gut zu erkennen, dass die Simulation mit Absorptionsgraden, die im Hallraum ermittelt wurden, bessere Ergebnisse liefert. Demgegenüber steigt der Fehler der Simulation mit ebenem Absorptionsgrad mit größer werdender Komplexität an. Ein dem Schallfeld entsprechender Absorptionsgrad ist für eine präzise Simulation wesentlich, da sonst ein mit den absorbierenden Oberflächen wachsender systematischer Fehler die Simulationsgüte beeinträchtigt.

In einer weiteren Messung (vgl. [2]) werden in den leeren Hallraum 1,60 m hohe Trennwände eingebaut, die den Raum der Länge nach dritteln. Die Trennwände werden, wie in der vorhergehenden Messung, mit Absorptionsmaterial beklebt, die Wände des Hallraums bleiben schallhart. Durch diese Umbauten wird das diffuse Feld im Hallraum gestört und es entstehen von der Schallquelle abgeschattete Bereiche. **Bild 2** zeigt die SIL3 Pegel für Messung und Simulation für 2 Quellen mit jeweils 3 Mikrofon Positionen. Die Abweichun-

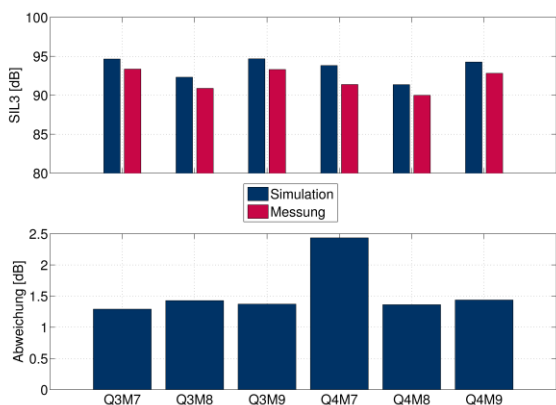


Bild 2: Vergleich von Simulationen und Messung an verschiedenen Positionen im Hallraum mit zwei Trennwänden
gen liegen, trotz des für die Modellvorstellung nicht mehr idealen Messaufbaus, bis auf einen Wert unterhalb von 1,5

dB. Ein zunehmender Fehler für große Helmholtzzahlen ist nur zu erwarten für eine ebenfalls große äquivalente Absorptionsfläche des betrachteten Raums. Im Fall der VIP-Kabine mit überwiegend schallharten Raumbegrenzungsflächen kann mit einer zufriedenstellenden Simulationsgüte gerechnet werden.

Die hier als letztes vorgestellte Messung wurde im Private Office eines voll ausgestatteten A319 vorgenommen. Der SIL3 Pegel bei Beschallung mit einem Dodekaeder wurde an zwei Mikrofonpositionen aufgezeichnet und simuliert. **Tabelle 2** zeigt den Vergleich von Messung und Simulation für Absorptionsgrade aus dem Impedanzrohr und nach EN ISO 10534-2 für Diffusfelder umgerechnete α . Die Abweichungen liegen für beide Messpositionen unterhalb von 1 dB.

Tabelle 2: Vergleich der SIL3 Pegel aus Messung und Simulation in VIP-Kabine A319

	Messung SIL3 [dB]	Simulation α_{eben} SIL3 [dB]	Simulation α_{diffus} SIL3 [dB]
Pos. 1	96,2	96,1	95,3
Pos. 2	96,1	96,3	95,2

Zusammenfassung und Ausblick

Es wurde ein Ray-Tracing-Verfahren zur Berechnung des SIL3 Pegels in VIP-Flugzeugkabinen validiert. Die simulierten Werte wurden mit gemessenen SIL3 Pegeln verglichen. Die hier vorgestellten 3 Messungen fanden

- unter idealen Voraussetzungen für das Modell in einem leeren Hallraum statt,
- in einem durch Trennwände zergliederten Hallraum
- und in einer VIP-Flugzeugkabine.

Es konnte eine gute Übereinstimmung von Simulations- und Messergebnissen festgestellt werden.

Die Berücksichtigung realer Quellen und Unsicherheiten bezüglich der Simulationseingangsparameter werden in aktuellen Forschungsarbeiten untersucht.

Die Autoren danken der Freien und Hansestadt Hamburg für die finanzielle Förderung dieses Projektes unter HH124B.

Literatur

[1] Cremer, L.; Müller, H. A.: Die wissenschaftlichen Grundlagen der Raumakustik, Band I, S. Hirzel Verlag, Stuttgart, 1978

[2] Hienen, J.: Messung und Simulation des Schalldruckpegels in Räumen in Abhängigkeit von der Helmholtzzahl, Bachelorarbeit, Institut für Modellierung und Berechnung, TUHH, 2010

[3] Hoge, K.; Rescheleit, M.; von Estorff, O.: Rechenmodell zur Simulation des Akustikkomforts in Flugzeugkabinen; 36. Jahrestagung für Akustik DAGA 2010, Berlin, 2010.