

Validierung eines Modells zur Vorhersage des Richtcharakteristikeinflusses auf raumakustische Messungen

Ingo Witew, Mark Müller-Giebeler, Michael Vorländer

Institut für Technische Akustik, RWTH Aachen University, Kopernikusstraße 5, 52074 Aachen

E-Mail: Ingo.Witew@akustik.rwth-aachen.de

Einleitung

Raumakustische Messungen können ein hilfreiches Werkzeug zur quantitativen Beschreibung eines Schallfeldes sein. Die Messergebnisse bilden oftmals die Grundlage um Eigenschaften eines Schallfeldes physikalisch nachzuweisen. Die Belastbarkeit solcher Resultate ist jedoch erst mit der Berücksichtigung der Messunsicherheit gegeben. In der Vergangenheit wurden zahlreiche Untersuchungen durchgeführt, um die Messunsicherheit raumakustischer Messungen zu untersuchen. Ein Aspekt der Messunsicherheit, der in diesem Beitrag diskutiert wird, ist der Einfluss der Richtcharakteristik auf raumakustische Messungen. Dazu wurde ein Modell entwickelt, welches schon vor der Durchführung einer Messung in der Lage sein soll, die zu erwartende Messunsicherheit vorherzusagen. Dieses Modell basiert auf den Annahmen der statistischen Raumakustik und kann durch Angabe der Richtcharakteristik der Schallquelle und elementarer Raumeigenschaften (wie z.B. dem Raumvolumen und der Wandeigenschaften) die Messunsicherheit vorhersagen.

Akustische Messungen zur Validation

Um einen empirischen Datensatz zu schaffen, aus dem durch Vergleich die Genauigkeit der Modellvorhersage bestimmt werden kann, wurden umfangreiche Messungen im Modellmaßstab durchgeführt. Diese Messungen wurden in einem Hallraum durchgeführt, der in verschiedenen Messreihen systematisch durch variable Wände und Absorptions- und Streuelemente variiert wurde, so dass Messdaten aus verschiedenen Raumvolumina, Absorptionsstufen und Streugraden gesammelt werden konnten. Eine einzelne Messreihe besteht aus 72 wiederholten Messungen, wobei der Messlautsprecher zwischen jeder Messung automatisiert in 5°-Schritten gedreht wurde. Die Raumimpulsantworten wurden mit 24 Mikrofonen gemessen. [1]

Datenvorverarbeitung

Um den Einfluss der Quellenrichtcharakteristik als Funktion des zeitlichen Verlaufs der Impulsantwort diskutieren zu können und um den Einfluss kleinster Phasenunterschiede zwischen den verschiedenen Messungen einer Reihe, die nicht auf die Richtcharakteristik zurückzuführen sind, minimieren zu können, werden die Impulsantworten in einem ersten Schritt zu überlappenden (Hamming-) Zeitfenstern, der Länge 10 ms, zusammengefasst. Der Einfluss der Richtcharakteristik wird in der Betrachtung eines einzelnen Zeitfensters über die 72 Messungen einer vollständigen Umdrehung des Messlautsprechers deutlich. Aufgrund der Rotationssymmetrie des Lautsprechers (bei Dodekaedern 120°) können im Winkelspektrum sogenannte charakteristische Periodizitäten (d. h. ganzzahlige Vielfache

der Symmetrie) identifiziert werden, so dass der Einfluss der Lautsprecher-Richtcharakteristik isoliert diskutiert werden kann. In diesem Verarbeitungsschritt werden alle nichtcharakteristischen Periodizitäten zu Null „gesetzt“.

In einem letzten Vorverarbeitungsschritt werden alle verbleibenden Periodizitäten auf den Gleichanteil normiert, da im Weiteren nur noch relative Fehler diskutiert werden sollen. Entsprechend steht zwar die Information zum Abklingen des Schallfeldes (Nachhall) nicht mehr zur Verfügung, diese wird aber auch hier nicht benötigt.

Messunsicherheit

Da das Modell als Werkzeug zur Messunsicherheitsdiskussion konzipiert wurde, ist es sinnvoll, genau diese Vorhersage als Maßstab zu verwenden, um die Qualität des Modells bezogen auf die empirisch bestimmte Unsicherheit zu charakterisieren. Da sich die Unsicherheitsanalyse in der späteren Anwendung des Modells, je nach diskutierter Zielgröße, im Detail unterscheiden kann, wird zur Evaluation des Modells zunächst die Unsicherheit für jedes Zeitfenster isoliert diskutiert. In einfachen Situationen würde hierfür aus den auswertbaren Daten die Standardabweichung bestimmt. Diese ist genau genommen jedoch nur auf solche Datensätze anwendbar, von denen bekannt ist, dass sie normalverteilt sind. Bei den vorliegenden Daten ist das durch geeignete Tests jedoch nicht mit zufriedenstellender Sicherheit nachweisbar. Daher ist es eher angebracht, Quantilsgrenzen als Kenngrößen für die Messunsicherheit zu verwenden. Die Quantile 0.16 und 0.84 entsprechen genau den Grenzen, die bei einem normalverteilten Datensatz durch die einfache ($k=1$) Standardabweichung bestimmt werden würden. Die Genauigkeit dieser Quantilsbestimmung lässt sich durch eine Schätzung von Maritz & Jarrett erfassen und fällt (siehe roter Bereich in Abb. 1.) selbst bei den kleinsten Datensätzen so gering aus, dass sie vernachlässigt werden kann.

Bei der Diskussion der zeitlichen Veränderung der Messunsicherheit ergibt sich der in Abb. 1 gezeigte Verlauf, der für alle individuellen Messreihen, aber auch für zusammengefasste Datensätze charakteristisch ist. Er ist durch vier Bereiche gekennzeichnet. Mit dem Eintreffen des Direktschalls und bei den direkt nachfolgenden Reflexionen ist die Unsicherheit am größten (I) und fällt schnell auf ein konstantes Niveau (II) ab. Im weiteren Verlauf ist ein Bereich (III) erkennbar in dem der Messfehler entlang einer Sigmoid-Kurve weiter abfällt und bis zum Ende des Datensatzes wieder auf einem konstanten Niveau (IV) bleibt.

Diese Bereiche lassen sich direkt mit dem zeitlichen Verlauf der Impulsantwort in Bezug setzen. Bereich IV ist der Bereich der Impulsantwort, in dem die Impulsantwort unter das Niveau der Störgeräusche gefallen ist. Bereich III

kennzeichnet den Bereich der Impulsantwort, in der diese weniger als ca. 10 dB Signal-Rausch-Abstand aufweist. Bei gemittelten Datensätzen beginnt dieser Bereich ab dem Zeitpunkt, zu dem die erste Impulsantwort weniger als 10 dB SNR aufweist und endet mit dem Zeitpunkt bei dem die letzte Impulsantwort weniger als 0 dB SNR hat. Der Bereich II ist der Zeitraum exponentiellen Abklingens der Raumimpulsantwort. Bereich I ist der unmittelbar dem Eintreffen des Direktschalls folgt. Diese letztgenannte Grenze lässt sich aus der ursprünglichen Impulsantwort nicht mit einfachen Mitteln ablesen. Aus dem zeitlichen Verlauf der Quantile lässt sich dieser Übergang jedoch recht zuverlässig durch eine Modifikation des Lundebys-Algorithmus[2] zur Bestimmung des Zeitpunkts zu dem eine RIR in das Hintergrundrauschen eintaucht, bestimmen.

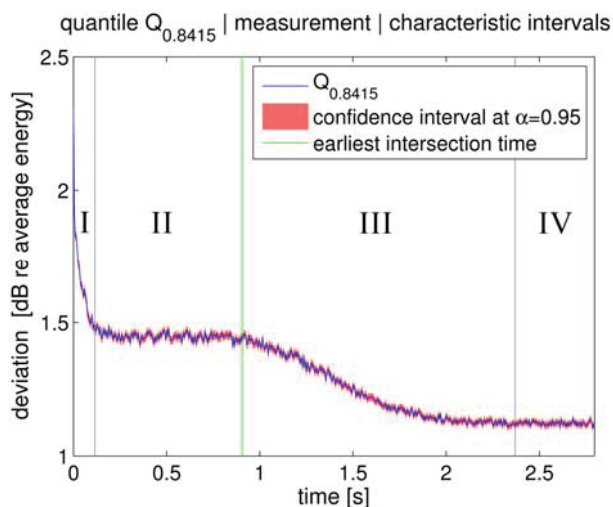


Abbildung 1: Zeitlicher Verlauf der Messunsicherheit in Raumimpulsantworten.

Validation des Modells

Um die empirisch bestimmte Messunsicherheit mit der Vorhersage des Modells zu vergleichen, ist der detaillierte zeitliche Verlauf jedoch nur bedingt geeignet, da nicht zu erwarten ist, dass kleinste Einzelheiten mit einem statistischen Ansatz bis ins Letzte vorhergesagt werden können. Aus diesem Grund werden die Messwerte der einzelnen 5 ms-Zeitfenster zu den Bereichen I und II zusammengefasst. Aus der Datenbasis der jeweiligen Zeitbereiche werden die Quantile bestimmt und mit den entsprechenden Vorhersagen des Modells verglichen.

	Messunsicherheit [dB]				ΔQ [dB]	
	Messung		Simulation		$Q_{0.16}$	$Q_{0.84}$
	$Q_{0.16}$	$Q_{0.84}$	$Q_{0.16}$	$Q_{0.84}$		
I	-2.70	+1.67	-3.90	+1.99	-1.20	+0.32
II	-2.17	+1.45	-1.99	+1.35	+0.18	-0.10

Tabelle 1: Unsicherheit in der Impulsantwort in den Zeitfenstern I und II

Die Ergebnisse dieses Vergleichs können aus Tabelle 1 abgelesen werden. Durch den Parameter ΔQ ist die Abweichung zwischen der Modellvorhersage und der empirischen Unsicherheit als Differenz zusammengefasst. Aus diesen Daten ist erkennbar, dass das Modell die Messunsicherheit in den frühen (I.) Teilen der Impulsantwort überschätzt, wohingegen die Unsicherheit im späteren (II.) Teil der Impulsantwort unterschätzt wird.

Verbesserung des Modells

Aus dem Ansatz, mit dem Schallstreuung modelliert wurde, ergibt sich Potential zur Verbesserung der Vorhersage. Je nach Streugrad wird neben der Energie im spiegelnden Anteil eines Schallrückwurfs noch Energie auf Rückwürfe gestreuter Anteile in der simulierten Raumimpulsantwort eingefügt. Die Anzahl der gestreuten Rückwürfe lässt sich bei diesem pragmatischen Ansatz jedoch nicht durch physikalische Überlegungen bestimmen, und so bietet sich diese Variable als „Stellschraube“ zur Optimierung an.

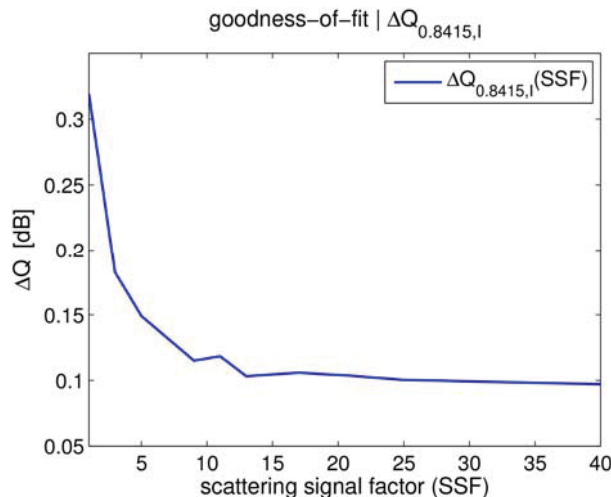


Abbildung 2: Qualität der Modellvorhersage als Funktion der Anzahl der gestreuten Schallrückwürfe.

In umfangreichen Simulationsreihen wurde die Modellvorhersage und die empirische Unsicherheit für verschiedene Anzahlen gestreuter Rückwürfe (SSF in Abb. 2) miteinander verglichen. Es zeigt sich, dass die Modellvorhersage mit größerer Anzahl gestreuter Schallrückwürfe immer weniger von den empirischen Unsicherheiten abweicht, wobei jedoch der Rechenaufwand entsprechend, proportional, steigt. Mit 9 Rückwürfen zur Modellierung der Schallstreuung scheint ein vertretbarer Kompromiss gefunden worden zu sein, da die Abweichung ΔQ im Zeitbereich I für das 0.16-Quantil von +0.32 dB auf +0.12 dB reduziert wurde. Für das 0.84-Quantil ergibt sich analog eine Verbesserung von -1.20 dB auf -0.49 dB.

Zusammenfassung / Schlussfolgerungen

In diesem Beitrag wurde gezeigt, wie sich die Richtcharakteristik eines Messlautsprechers auf gemessene Raumimpulsantworten auswirkt. Es wurde weiter gezeigt, wie dieser Einfluss durch Ansätze der statistischen Raumakustik modelliert werden kann. Durch Optimierung konnte die Modellgenauigkeit weiter verbessert werden. In zukünftigen Schritten werden weitere Frequenzen analysiert und zusätzlich Untergruppen der Messdaten ausgewertet, um festzustellen, welchen Einfluss Sekundärgrößen auf die Modellvorhersage haben.

Literatur

- [1] T. Knüttel, I. Witew, M. Vorländer: Influence of “omnidirectional” loudspeaker directivity on measured room impulse responses. JASA 134 (2013), 3654-3662
- [2] A. Lundebys, T. vigran, H. Bietz, M. Vorländer: Uncertainties of measurements in room acoustics. Acta Acustica 81 (1995), 344-355