

# Effiziente Diskretisierung von Schallfeldern in akustischen Kavitäten

Moritz Becker<sup>1</sup>, Gerhard Müller<sup>1</sup>, Martin Buchschmid<sup>1</sup>

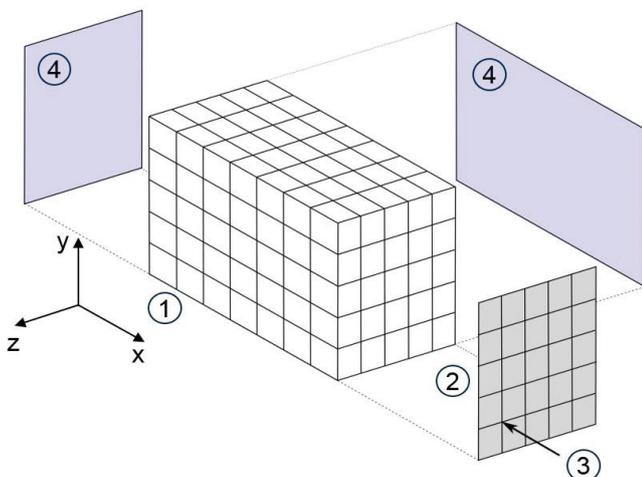
<sup>1</sup> Lehrstuhl für Baumechanik, Technische Universität München, 80333 München, E-Mail: mor.becker@tum.de

## Einleitung

Die Messung von Schallfeldern in akustischen Kavitäten erfolgt in der Praxis oft über eine analoge Integration des Schalldrucks über die Raumpunkte mit sogenannten Schwenkarmmikrofonen. Grund für diese räumliche Mittelung ist die mit steigender Frequenz immer stärkere lokale Schwankung des Schalldruckfeldes bedingt durch die ansteigende modale Dichte, sowie die Abhängigkeit der Ergebnisse vom Ort der Lastaufbringung und schwer kontrollierbaren Parametern wie Temperatur- und Luftfeuchteverteilung. Im Rahmen des Beitrags wurde untersucht, wie sich abgeleitete Größen des Schallfeldes mit sukzessiver Ausdünnung des Abtastrasters verändern. Hierzu wurde die Kavität mit Hilfe von finiten Elementen mit hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung modelliert. Im Nachgang an eine harmonische Analyse wurden Abtastraster verschiedener Dichte angewandt und die Abweichung abgeleiteter Größen zu einer Referenzkonfiguration untersucht. Weiterhin wurde eine Konfiguration aus wenigen Messpunkten mit bestmöglichen Konfidenzintervallen erarbeitet.

## Numerisches Modell

Die Modellierung mit finiten Elementen erfolgte mit Hilfe des Software-Pakets ANSYS<sup>TM</sup>. Das Modell besteht aus der akustischen Kavität, welche mit 20-knotigen Hexaeder-Akustik-Elementen modelliert wurde. Eine Wand der Kavität besteht aus einer biegeweichen Platte, die mit 8-knotigen Kirchhoff-Plattenelementen diskretisiert wurde. Auf zwei weiteren Randflächen können reelle und komplexe Impedanzen als Randbedingung definiert werden (vgl. Abbildung 1).



**Abbildung 1:** FEM-Modell mit akustischer Kavität (1), biegeweicher Platte (2), harmonisch oszillierender Last (3) und Impedanzrandbedingungen (4).

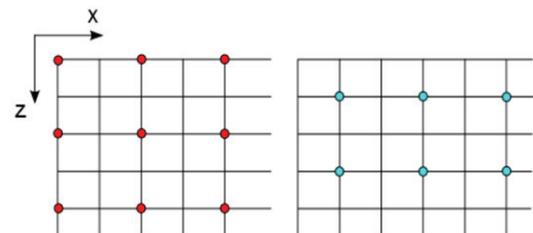
Im Zuge der Untersuchungen wurden mit Hilfe der Impedanzrandbedingungen Raumbegrenzungen definiert, deren Absorptionsgrad und damit die Nachhallzeit  $T$  im Raum mit dem Absorptionskoeffizienten  $\alpha$  gesteuert wird [1]. Alle weiteren Randflächen der Kavität wurden als vollständig reflektierend definiert. Um eine ausreichende Auflösung der kleinsten Wellenlängen in der Kavität zu gewährleisten wurde die Netzdichte an die größte Frequenz angepasst, die in einer harmonischen Analyse untersucht wurde, sodass die kleinste auftretende Wellenlänge mit 8 Elementen aufgelöst wird. Zwischen dem akustischen Volumen und der Platte wird eine sog. FSI-Flag definiert [2], welche in der Software ANSYS<sup>TM</sup> eine Kopplung der Verschiebung bzw. Schnelle von gemeinsamen Fluid- und Strukturknoten, sowie gleiche Druckspannungen auf Fluid- und Strukturseite erzwingt.

Das dabei entstehende unsymmetrische Gleichungssystem wurde anschließend in einer harmonischen Analyse in Schritten von 1 Hz gelöst.

## Abtaststufen

Implementiert wurden 4 Stufen des Abtastrasters, welche unterschiedlich dicht sind:

- Stufe I: Abtastung der Drücke in allen Knoten des Finite-Elemente-Netzes. Stufe I dient als Vergleichskonfiguration für die Ergebnisse aus den Stufen II bis IV.
- Stufe II: In jeder Raumrichtung des akustischen Volumens wird in x- und z-Richtung nur noch jeder zweite Knoten abgetastet (vgl. Abbildung 2). Die Anzahl der erfassten Knoten reduziert sich damit auf ca. ein Viertel der Gitterpunkte.



**Abbildung 2:** Abtastschema bei Stufe II. Links: Ebene mit ungeradem Index. Rechts: Ebene mit geradem Index.

- Stufe III: Benutzerdefinierte Anzahl und Position von 20 bis 30 Abtastpunkte.
- Stufe IV: Benutzerdefinierte Anzahl und Position von 4 Abtastpunkten. Damit soll eine reale Messanordnung simuliert werden.

Weiterhin wurde eine Abtastmöglichkeit mit sog. Mittelungsternen implementiert. Dabei wird der Schallwecheldruck eines auszuwertenden Knotens aus dem Mittelwert seiner (bis zu 6) unmittelbaren Nachbarn gebildet. Diese Art der Vorabtastung entspricht den in der Praxis eingesetzten Schwenkarmmikrophonen und kann bei jeder Abtaststufe verwendet werden.

### Charakteristische Schallfeldgrößen

Die ausgedünnten Abtastraster wurden anhand der folgenden zwei charakteristischen Größen des Schalldruckfeldes verglichen:

1. Frequenzverlauf des über den Ort gemittelten, Schalldruckpegels:

$$\tilde{L}(f) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N 10 \cdot \log \left( \frac{p_i^2(f)}{p_0^2} \right) \quad [\text{dB}] \quad (1)$$

Hierbei stellt N die Anzahl der Abtastpunkte dar.

2. Gemittelter Schalldruckpegel aus allen Abtastpunkten und Frequenzen:

$$\tilde{L} = 10 \cdot \log \left( \frac{p_{ges}^2}{p_0^2} \right) \quad [\text{dB}] \quad (2)$$

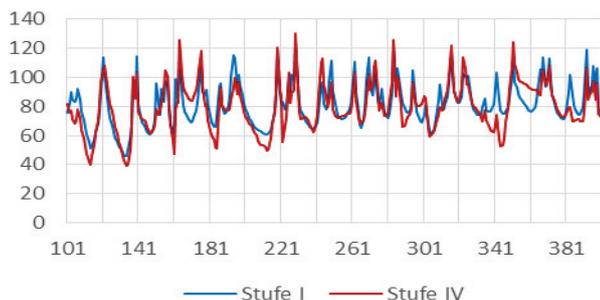
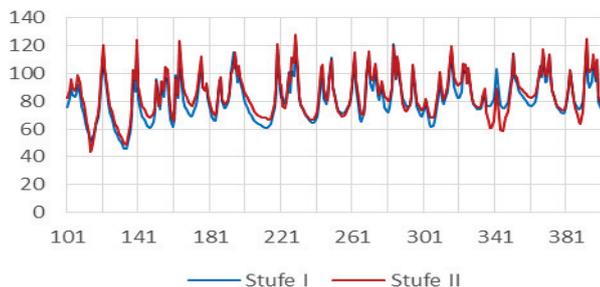
mit

$$p_{ges}^2 = \frac{1}{N} \frac{1}{M} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M p_{ij}^2 \quad (3)$$

Wobei N die Anzahl der Abtastpunkte und M die Anzahl der erfassten Frequenzpunkte angibt.

### Simulation

- $f_{\text{Start}} = 101 \text{ Hz}$ ,  $f_{\text{Ende}} = 400 \text{ Hz}$
- $\alpha = 0.41 \rightarrow T = 0.5 \text{ s}$



**Abbildung 3:**  $\tilde{L}(f)$  bei Stufe I-II und Stufe I-IV (Punktabtastung)

Abtaststufe	Punkte		Sterne	
	$\tilde{L}$	Abweichung zu I	$\tilde{L}$	Abweichung zu I
Stufe I	94.86	-	96.39	1.53
Stufe II	96.48	1.62	94.89	0.03
Stufe III				
nahe Wand	97.41	2.55	96.09	1.23
nahe Kern	95.21	0.35	95.74	0.88
Stufe IV				
nahe Wand	95.86	1.0	95.59	0.73
nahe Kern	95.47	0.61	95.79	0.93

**Tabelle 1:** Vergleich von  $\tilde{L}$  (Punkt- und Sternabtastung)

Für die im Zuge der Untersuchung durchgeführten Simulationen führte sowohl die Abtastung mit Punkten als auch mit Sternen zu einer Überhöhung sowohl des Frequenzverlaufs des Pegels als auch des gesamten gemittelten Pegels (Abbildung 3 und Tabelle 1). Diese Abweichung ist allerdings stark von der Positionierung der Abtastpunkte im Raum abhängig; die höchste Abweichung von 2.55 dB entsteht durch eine Abtastkonfiguration aus 27 Punkten, welche aber allesamt nahe den Wänden positioniert wurden und daher in Bereichen überhöhten Druckes durch Reflexionen liegen. Ein Verschieben der Abtastpunkte in die Nähe des Kerns der Kavität reduziert diese Abweichung auf 0.35 dB. Eine Konfiguration aus 4 Punkten, vergleichbar mit einer realen Messanordnung ruft je nach Positionierung Überhöhungen zwischen 1.0 und 0.61 dB hervor. Ein Abstand von  $L_i/3$  bzw.  $1/6$  der größten auftretenden Wellenlänge erwies sich in den Untersuchungen als guter Abstand der Messpunkte von den Wänden; diese Abstände decken sich mit den z.B. in [3] empfohlenen Distanzen zwischen Wänden und Messpunkten.

Ein Vergleich der Ergebnisse von Punkt- und Sternabtastung zeigt, dass die Abtaststerne bei einer ungünstigeren Positionierung die robusteren Ergebnisse liefert (1.23 dB statt 2.55 dB auf Stufe III, 0.73 dB statt 1.0 dB auf Stufe IV). Werden die Abtastpunkte weit genug von den Wänden und Ecken entfernt platziert, so zeigt die Abtastung mit Punkten die bessere Übereinstimmung.

### Zusammenfassung und Ausblick

Die Simulation hat gezeigt, dass bereits eine Abtastkonfiguration aus 4 Punkte eine gute Approximation an den gemittelten Schalldruckpegel in der Kavität liefern kann. Dabei sollten die Abtastpunkte allerdings genügend Abstand zu den Wänden und Ecken der Kavität haben. Jedoch zeigen alle ausgedünnten Abtastmuster eine Überhöhung der ermittelten Werte im Vergleich zur

Referenzkonfiguration, die zwischen 0.4 und 3 dB liegen kann.

In weiteren Untersuchungen sollen die entwickelten Methoden auf Kavitäten mit komplizierterer Geometrie und Randschichten mit anderen Impedanzen angewendet werden.

## **Literatur**

- [1] Fahy F.: Engineering Acoustics, Elsevier Academic Press (2007)
- [2] ANSYS™ Mechanical APDL Acoustic Analysis Guide,  
URL:<http://148.204.81.206/Ansys/150/ANSYS%20Mechanical%20APDL%20Acoustic%20Analysis%20Guide.pdf>
- [3] DIN – EN – ISO 140 – 4, Beuth-Verlag