

Erhöhung der Diffusität von Hallräumen durch Optimierung der Raumform

Elmar Schröder

Müller-BBM GmbH, 82152 Planegg, Deutschland, Email: ESchroeder@MuellerBBM.de

Einleitung

Hallräume werden u. a. zur Messung der Schallleistung von Quellen [1] sowie zur Bestimmung der Schallabsorption [2] von Materialien genutzt. Darüber hinaus werden auch die Sende- und Empfangsräume bei Schalldämmungsmessungen [3] als Hallräume ausgebildet. Voraussetzung für eine normgerechte Messung ist dabei ein diffuses Schallfeld in den Hallräumen.

Es wurde ein numerisches Verfahren zur Erhöhung der Diffusität von Hallräumen durch eine geeignete Raumform entwickelt. Mit Hilfe dieses Verfahrens wurde eine optimale Raumform gefunden, und diese als Hallkabine mit einem Volumen von $6,35 \text{ m}^3$ realisiert.

Voraussetzungen für Diffusität

Eine notwendige Voraussetzung für ein diffuses Schallfeld ist, dass innerhalb der durch die Bedämpfung bestimmten Resonanzbreite einer Mode ausreichend viele Moden liegen. Diese werden bei einer gedachten sinusförmigen Anregung dann durch die spektrale Überlappung mit angeregt.

Je höher die Bedämpfung des Raumes ist, desto breiter ist die Resonanz und desto mehr Eigenmoden liegen innerhalb dieser Resonanzbreite. Quantitativ lässt sich gemäß M. R. Schroeder [4] die Grenzfrequenz eines Raumes beschreiben, bei der die Halbwertsbreite einer Mode ca. das Dreifache des mittleren Modenabstandes beträgt:

$$f_g = 2000 \sqrt{\frac{T}{V}} \quad [\text{Hz}] \quad (1)$$

wobei T Nachhallzeit in s
 V Volumen in m^3

Ein ausreichendes Volumen und eine sinnvolle Bedämpfung der Räume ist jedoch nur ein notwendiges Kriterium für eine ausreichende Diffusität. In akustisch ungünstigen Räumen, z. B. mit kreisförmigem oder elliptischem Grundriss, kann unabhängig von der o. g. Grenzfrequenz keine ausreichende Diffusität erreicht werden. Die Raumform ist daher neben der Grenzfrequenz eine zweite Randbedingung, die bei der Auslegung von Hallräumen berücksichtigt werden muss.

Grundsätzlich ist es möglich, auch akustisch ungünstige Räume durch eine ausreichende Anzahl von Diffusoren, die gleichmäßig im Raum verteilt werden, zu verbessern. Aus praktischen Gründen wird jedoch gern auf Diffusoren verzichtet, da die Diffusoren beim Einbringen der Prüfgegenstände in die Prüfstände oft stören. Darüber hinaus sind Diffusoren mit ausreichender Größe für den

tieffrequenten Bereich aufgrund der langen Wellenlängen praktisch nicht realisierbar. Große Diffusoren teilen den Hallraum in Teilräume, die eine zu geringe Kopplung für ein diffuses Schallfeld aufweisen.

Optimierungsparameter für die Raumform

Die stationäre Helmholtz-Gleichung der Akustik ist mathematisch identisch mit der stationären Schrödinger-Gleichung der Quantenmechanik. Die im Rahmen der Quantenmechanik entwickelten statistischen Methoden unter zu Hilfe-nahme der semiklassische Näherung zur Beschreibung von Eigenwertverteilungen in Nukleonen können daher für die Akustik von Räumen übernommen werden.

Im Rahmen der geometrischen Akustik kann zwischen klassisch chaotischen und regulären Hamilton-Systemen unterschieden werden. Für ein diffuses Schallfeld im Sinne der geometrischen Akustik muss das System chaotisch mischend sein [5], ein ergodisches System ist aufgrund der Raumbedämpfung nicht ausreichend. Die unterschiedlichen Eigenschaften der Hamilton-Systeme, wie regulär oder chaotisch, haben Auswirkungen auf die spektralen Korrelationen der korrespondierenden Wellensysteme. Während in regulären Systemen die Eigenwertverteilung einer Poisson-Verteilung entspricht, findet man in chaotischen Systemen eine Verteilung entsprechend dem Gaußschen Orthogonale Ensemble (GOE). In chaotischen Systemen liegt aufgrund der sogenannten Niveauabstoßung eine gleichmäßigere Eigenwertverteilung als in regulären Systemen vor [6].

Die statistische Verteilung der Eigenwerte kann anhand der spektrale Steife nach Dyson und Metha [7] beschrieben werden. Für die Optimierung der Raumform wurde die spektrale Steife aus dem Modenspektrum ermittelt.

Numerische Ergebnisse

Es wurde eine Modell mit sechs reflektierenden Raumbegrenzungsflächen und einem konstantem Volumen von $6,35 \text{ m}^3$ untersucht. Die Eigenwerte wurden mit Hilfe der Methode der finiten Elemente berechnet.

Zunächst wurden ein Quader mit den empfohlenen Kantenlängen nach ISO 3741 [1] und ein Würfel untersucht. Außerdem wurde mit Hilfe eines Optimierungsprozesses der Quader mit der kleinsten mittleren spektralen Steife ermittelt (Abbildung 1). Der Würfel hat aufgrund der Symmetrien und der entsprechend hohen Anzahl an entarteten Eigenwerten die größte spektrale Steife. Der Quader mit den Kantenlänge nach ISO 3741 und der numerisch optimierte Quader haben eine mittlere spektrale Steife, die für reguläre Systeme zu erwarten ist.

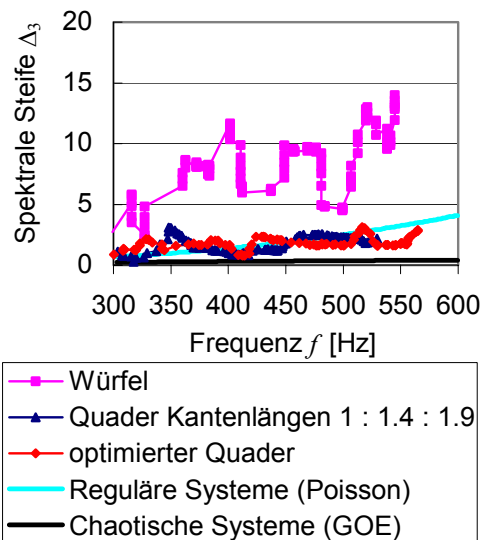


Abbildung 1: Mittlere spektrale Steife von Quadern als reguläre Systeme

Wird von einem Würfel nur eine Wand geneigt, ergibt sich die geringste mittlere spektrale Steife bei einem Winkel von 28,4° (Abbildung 2). Bei vier geneigten Wänden verringert sich der Wert nochmals. Um den theoretisch minimalen Wert zu erreichen, müssen alle sechs Wände zueinander geneigt werden. Werden davon zwei Wände mit Krümmungen versehen, verringert sich die Empfindlichkeit gegenüber Bautoleranzen.

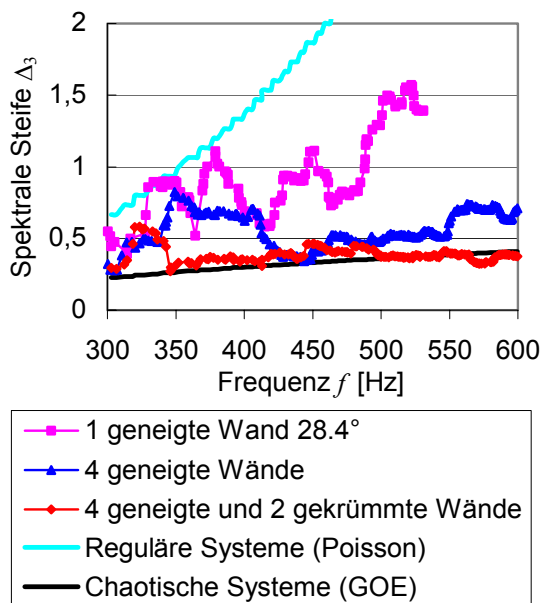


Abbildung 2: Mittlere spektrale Steife von Hexaedern

Experimentelle Ergebnisse

Die numerisch optimierte Raumform (4 geneigte Wände und 2 gekrümmte Wände) wurde in Form einer Hallkabine mit einem Volumen von 6,35 m³ gebaut. Grundsätzlich kann die Raumform für beliebige Volumina verwendet werden.

Zur experimentellen Überprüfung der Diffusität wurde der Schallabsorptionsgrad nach ISO 354 bei einer unterschiedlichen Anzahl an Diffusoren bestimmt. Diese Messungen

wurden in einem Quaderraum mit einem Volumen von 200 m³ und der optimierten Hallkabine durchgeführt. Als Absorber wurden 200 mm dicke Mineralfaserplatten im Holzrahmen verwendet (Abbildung 3).

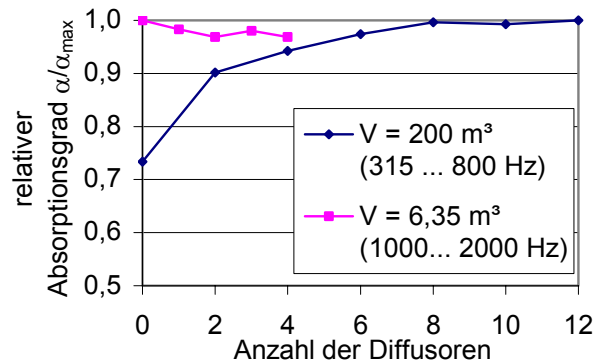


Abbildung 3: Relativer Schallabsorptionsgrad in Abhängigkeit von der Anzahl der Diffusoren

Im Falle des Quaderraumes (200 m³) zeigt sich der erwartete Anstieg des Schallabsorptionsgrades mit zunehmender Anzahl der Diffusoren bis zur Sättigung, während in der Hallkabine (6,35 m³) der Schallabsorptionsgrad abnimmt. Die Abnahme ist mit der Teilung des Hallkabinenraumes in unterschiedlich bedämpfte Teilräume bei der Messung der Nachhallzeit mit Absorber zu erklären.

Wie die experimentellen Ergebnisse zeigen, ist die spektrale Steife als Optimierungsparameter für die Raumform geeignet und kann daher bereits in der Planungsphase angewendet werden.

Literatur

- [1] DIN EN ISO 3741 Bestimmung der Schallleistungspegel von Geräuschquellen aus Schalldruckmessungen. Hallraumverfahren der Genauigkeitsklasse 1. Januar 2001
- [2] DIN EN ISO 354 Messung der Schallabsorption in Hallräumen. Dezember 2003
- [3] DIN EN ISO 140 Messung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen. Teil 3: Messung der Luftschalldämmung von Bauteilen in Prüfständen. März 2005
- [4] M.R. Schroeder, K.H. Kuttruff, On Frequency Response Curves in Rooms. Comparison of Experimental, Theoretical and Monte Carlo Results for the Average Frequency Spacing between Maxima, J. Acoust. Soc. Amer. **34** (1962), 76 - 80
- [5] J.-D. Pollack Modifying Chambers to play Billiards: the Foundations of Reverberation Theory, ACUSTICA **76** (1992), 257-272
- [6] M.C. Gutzwiller, Chaos in Classical and Quantum Mechanics, Springer-Verlag, New York, 1990
- [7] J.M. Dyson, M.L. Mehta, Statistical Theory of Energy Levels of Complex Systems. IV, Journal of mathematical physics **4** (1963), 701