

Akustische Moden in nicht-rechteckförmigen Räumen

Ingolf Bork

Physikalisch-Technische Bundesanstalt, 38116 Braunschweig, E-Mail: ingolf.bork@ptb.de

Einleitung

Das Schallfeld bei tiefen Frequenzen wird in kleinen Räumen durch die Eigenschwingungsformen, die so genannten Moden, bestimmt. In rechteckförmigen Räumen kann die Berechnung der Schalldruckverteilung über elementare cosinus-Funktionen erfolgen, während bei Abweichungen von der Quaderform aufwändigere Verfahren wie FEM-Berechnungen erforderlich sind. Hier sollen sowohl Ergebnisse von Berechnungen als auch Messungen an realen Räumen vorgestellt werden.

FEM-Berechnungen

Durch Eingabe der Geometrie eines geschlossenen Raumes sowie der akustischen Eigenschaften der inneren Begrenzungsflächen können mit einem modernen kommerziellen Programm wie COMSOL [1] die Eigenfrequenzen der Moden sowie die zugehörigen Schalldruckverteilungen bestimmt werden. Für derartige Berechnungen kann die Oberfläche entweder als akustisch hart oder weich angesetzt werden, da die Dämpfungseigenschaften hierzu nicht benötigt werden.

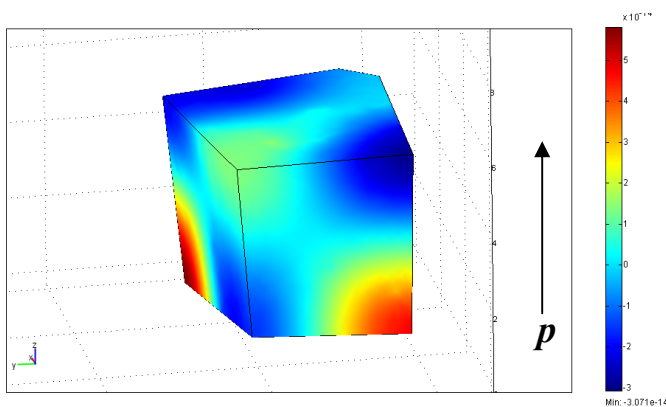


Abbildung 1: Darstellung einer Mode eines schiefwinkligen Raumes bei 51,8 Hz, rot: positiver Schalldruck, blau: negativer Schalldruck (Hallraum der PTB)

Die Darstellung der Ergebnisse erfolgt dabei üblicherweise wie in Abbildung 1 durch farbliche Kennzeichnung des Schalldruckwertes an der sichtbaren Oberfläche; alternativ sind auch die Schalldruckdarstellung in Schnittebenen oder die Darstellung von Flächen konstanten Schalldrucks möglich.

Messtechnische Bestimmung mit Hilfsmitteln der Modalanalyse

Zur messtechnischen Bestimmung der akustischen Moden wurde folgendes Verfahren angewandt [2]:

Es wird zunächst ein Messpunktraster festgelegt, das die Anordnung aller interessierenden Raumpunkte beschreibt. Der Raum wird über einen Lautsprecher breitbandig angeregt und zwar an einer Stelle, an der keine Schalldruckknoten erwartet werden, wie z.B. in einer Raumecke. Mit Hilfe eines einzigen Kondensatormikrofons mit Kugelcharakteristik wird an allen Messpunkten die komplexe Übertragungsfunktion $H(f,x,y,z)$ bestimmt, die gebildet wird aus den FFT-Spektren von Schalldruck und anregender Lautsprecherspannung. Diese Übertragungsfunktionen werden für jeden Messpunkt gebildet und im Rechner gespeichert.

Zur Auswertung der Daten unter der Modalanalyse-Software ME'scopeVES 4.0 [3] werden die Übertragungsfunktionen mit Hilfe eines MATLAB-Programmes so aufbereitet, dass jedem Messpunkt eine Übertragungsfunktion im ME'scope-Format zugeordnet wird. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die Software für mechanische Schwingungen im Raum ausgelegt ist und als Darstellungsgröße einen räumlichen Vektor erwartet. Für die Darstellung des skalaren Schalldrucks $p(f_n,x,y,z)$ ist daher jedem Messpunkt ein beliebig aber einheitlicher gerichteter Richtungsvektor zuzuordnen. Hiermit wird festgelegt, in welcher Richtung bei der abschließenden grafischen Animation der Modendarstellung jeder Punkt des Messpunktrasters periodisch ausgelenkt wird.

Die eigentliche Modalanalyse erfolgt, wie aus den mechanischen Anwendungen bekannt, durch Curvefit-Prozesse in der Umgebung der einzelnen Resonanzen im Spektralbereich. Es werden die modalen Parameter Resonanzfrequenz, Dämpfung und räumliche Schwingungsform bestimmt.

Darstellung der Raummoden

Für die Darstellung der Moden bei der Animation auf dem Bildschirm kommen zwei Methoden in Frage:

- bei der Vektordarstellung schwingt auf jedem feststehenden Messpunkt des Rasters ein Pfeil, dessen Amplitude den Betrag und dessen Phasenlage die relative Phase des betreffenden Messwertes des Schalldrucks anzeigt.
- bei der Animation der Messpunkte schwingen die Messpunkte selbst nach Betrag und Phase des Schalldrucks und die Verbindungslinien des Messpunktrasters lassen durch ihre Bewegung den räumlichen Schwingungsverlauf erkennen.

Durch geeignete Wahl des Darstellungsverfahrens lassen sich auch sehr dichte Messpunktsysteme mit über 2000 Messpunkten noch in ihrer Schwingungsstruktur erkennen (vgl. Abb.2).

Bezeichnung der akustischen Moden

In Anlehnung an die übliche Bezeichnungsart der Moden des dreidimensionalen Rechteckraums können bei Räumen mit geringer Abweichung von der Quaderform analoge Bezeichnungen verwendet werden. Hierbei kennzeichnen die drei Indizes die Anzahl der Knotenebenen in x-, y- und z-Richtung beim Quader.

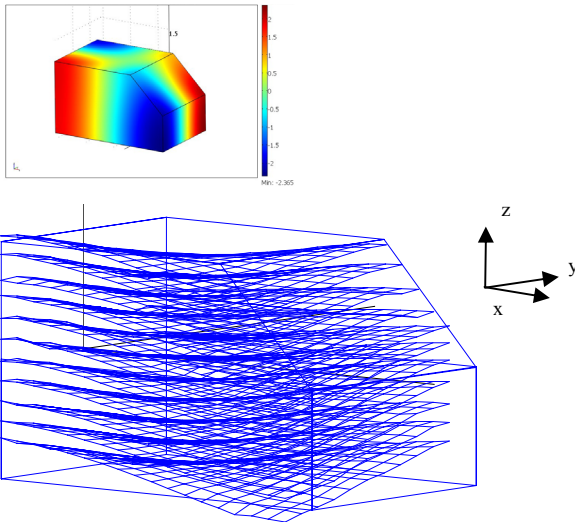


Abbildung 2: Statische Darstellung einer räumlichen 110-Mode gemessen in 11 Ebenen durch Auslenkung der Messpunkte. Die zwei Schwingungsknotenflächen ergeben sich aus den beiden sich kreuzenden senkrechten Ebenen $x=\text{const}$, und $y=\text{const}$. Die Schnittlinie geht durch die Mitte aller Messpunktebenen. Oben zum Vergleich die Oberflächendarstellung der FEM-Berechnung.

Durch genaue Beobachtung der Schwingungsformen des Raumes wie z.B. in Abb.2 und Vergleich mit den FEM-Berechnungen ist es möglich, auch komplexere Schwingungsmoden wie z.B. die 312-Mode zu identifizieren

Anwendungen

Welche Schlüsse können aus derartigen Messungen gezogen werden?

Wie in der mechanischen Schwingungsmodalanalyse geben die räumlichen Schalldruckverteilungen bei den modalen Frequenzen Aufschluss über die ortsabhängige Anregbarkeit der Raumresonanzen. So kann in einem Raumbereich starker Schalldruckamplitude die betreffende Frequenz gut durch eine Schallquelle (Lautsprecher, Wandschwingung, mechanischer Schwinger) angeregt werden, im Bereich einer Knotenlinie dagegen nur sehr schwach. Wird beispielsweise ein elektrisches Gerät, das ein starkes Netzbrummen bei 100 Hz abstrahlt, im Bereich eines Schalldruckmaximums einer 100 Hz-Mode aufgestellt, wird das Geräusch entsprechend der modalen Raumresonanzgüte verstärkt. Umgekehrt erlaubt die Kenntnis dieser Zusammenhänge eine gezielte Platzierung des Gerätes oder umgekehrt eine Modifizierung der Raumgeometrie zur Verstimmung der Mode. So könnte durch Veränderung der Möblierung eine Situation erreicht werden, bei der das schallabstrahlende Gerät genau im Knoten einer 100 Hz-Mode steht. Eine

solche Optimierung könnte mit Hilfe einer FEM-Simulation berechnet werden.

In der Praxis genügt zur Bestimmung der tiefen Raumresonanzen die Messung der Übertragungsfunktionen an ausgewählten Punkten oder in bestimmten Ebenen im Raum. Zur Lokalisierung von Knotenpunkten einzelner Moden kann anschließend mit Hilfe eines Schallpegelmessgerätes mit Schmalbandfilter das Schalldruckminimum bei der betreffenden Resonanzfrequenz gesucht werden.

Bei der Optimierung der Aufstellung von Lautsprecherboxen insbesondere für die Tieftonabstrahlung („Subwoofer“) ist die Kenntnis der räumlichen Schwingungsverteilung bei den Moden von besonderer Bedeutung. Hier sind wegen der breitbandigen Schallabstrahlung auch die Schalldruckverhältnisse bei Frequenzen zwischen den Moden wichtig. Durch Beobachtung der Frequenzgänge der Übertragungsfunktionen an verschiedenen Aufstellungsorten können optimale Positionen bestimmt werden.

Weiterhin kann auch die Anbringung von Tieftonabsorbieren durch die Ergebnisse der Modalanalyse optimiert werden.

Zusammenfassung

Die Modalanalyse des Schallfeldes beliebig geformter Räume erlaubt detaillierte Aussagen zur Wirkung tieffrequenter Schallquellen an verschiedenen Aufstellungsorten. Sie kann generell zur Optimierung der raumakustischen Eigenschaften im Tieftonbereich eingesetzt werden.

Literatur

- [1] COMSOL : <http://www.comsol.de/>
- [2] Bork, I.: "Modalanalyse von Schallfeldern" *Acustica* 75(1991), S154-167
- [3] ME'scopeVES: <http://www.vibetech.com/>